

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zemní kapacitní proudy a možnosti jejich kompenzace
v sítích nn a vn

Earth Fault Currents and Compensation in MV and LV Networks

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat Doc.Dr.Ing. Jiřímu Gureckému za odborné konzultace a pomoc při vypracování Bakalářské práce.

Odevzdání: 7. 5. 2010

Pavel Gold

Anotace

Cílem této práce je vysvětlit problematiku zemního spojení v kabelových a venkovních sítích nn a vn a objasnit vznik a průběh přechodného jevu v síti, který se snažíme potlačit. Jsou zde popsány všechny známé druhy kompenzace. Dále jsou zde popsány všechny způsoby lokalizace místa zemního spojení, například systémem Swedish Neutral, který lze považovat za nejmodernější způsob jak kompenzace, tak i lokalizace. Na závěr je uveden příklad výpočtu kompenzačního prvku modelové sítě.

Abstrakt

The aim of this paper is to introduce the issue of fault in the cable and outdoor LV and MV. The possibility of a transitional phenomenon in the network, which is trying to suppress. There are described all known types of compensation. It describes several ways of locating fault basin, for example, Swedish Neutral system, which can be considered the most modern way of compensation, and localization. In conclusion, an example of calculating the compensation element.

Klíčová slova

elektrizační soustava, kapacita vedení, zemní spojení, kompenzace zemních kapacitních proudů, lokalizace místa spojení, druhy kompenzace, zhášecí tlumivka

Key words

electricity system capacity management, ground connections, ground capacitive compensation currents localization site connections, modes of compensation arc reactor

Seznam použitých symbolů a zkratek

A	ampér	R_P	přechodný odpor [Ω]
C	celková kapacita vztažená k zemi [F]	R_L	odpor tlumivky [Ω]
C_0	kapacita vůči zemi [F]	R_Z	odpor země [Ω]
C'	celková kapacita vůči fázím [F]	$R_{stř}$	odpor ve střídavém obvodu [Ω]
C_e	celková kapacita [F]	R_{ss}	Odpor ve stejnosměrném obvodu [Ω]
$\cos\varphi$	účinník	S	zdánlivý výkon [VA]
G	svodová vodivost [S]	U	elektrické napětí sdružené [V]
H	Henry	U_{1F}	vstupní fázové napětí [V]
Hz	Hertz	U_{2F}	výstupní fázové napětí [V]
I	elektrický proud [A]	U_f	elektrické napětí fázové [V]
I_{por}	poruchový proud [A]	U_0	napětí uzlu vůči zemi [V]
I_L	proud tlumivky [A]	Z	impedance poruchové smyčky [Ω]
I_{kap}	proud kapacitní [A]	Z_R	impedance smyčky vodič - zem [Ω]
I_{pmin}	min. hodnota poruchového I [A]	Z_t	teoretická hodnota impedance [Ω]
I_R	proud procházející rezistorem [A]	a, b, c	značení fází
I_{NAB}	nabíjecí proud [A]	f	kmitočet [Hz]
k_0	kapacita proti zemi [F]	α	činitel útlumu
L	indukčnost [H]	ϵ	činitel nesymetrie
L_{123}	jednotlivé fáze a, b, c	ϵ_r	relativní permitivita [F/m]
ΔP_j	jouleovy ztráty [W]	ρ	měrná rezistivita [$\Omega mm^2/km$]
P	činný výkon [W]	ω	úhlová rychlost [rad/s]
Q_e	celkový náboj [C]	u_m	okamžitá hodnota amplitudy [V]
Q_C	náboj na kapacitách zdravých fází [C]	u_{e0}	elektrostatické napětí na uzlu [V]
Q	jalový výkon [VAr]		
R	odpor rezistoru [Ω]		

Obsah

1	Popis kabelových sítí nn a vn	5
1.1	Parametry vedení	5
1.1.1	Činný odpor vedení	5
1.1.2	Indukčnost vedení.....	6
1.1.3	Indukčnost kabelů.....	7
1.1.4	Kapacita kabelů	7
1.2	Kladení kabelových vedení	9
1.3	Vodiče pro venkovní vedení	11
1.3.1	Použití vodičů, konstrukce a materiály.....	11
1.3.2	Rozdělení z hlediska konstrukce vodiče u venkovních vedení.....	12
1.3.3	Hladiny napětí.....	13
2	Teoretický rozbor vzniku zemního spojení	14
2.1	Popis zemního spojení	14
2.2	Rozdělení zemních spojení	15
2.3	Přerušované zemní spojení v síti s izolovaným uzlem.....	16
2.4	Trvalé zemní spojení v síti s izolovaným uzlem.....	18
2.5	Odporové zemní spojení	19
3	Možnosti kompenzace zemních kapacitních proudů.....	21
3.1	Nepřímo uzemněná síť přes zhášecí tlumivku.	21
3.1.1	Ladění zhášecí tlumivky	24
3.2	Nepřímo uzemněná síť přes odpor.....	25
3.3	Síť s přechodným uzemněním uzlu.....	27
3.4	Soustava s nepřímo uzemněným nulovým uzlem přes Bauchův transformátor	27
4	Možnosti lokalizace místa zemního spojení.....	28
4.1	Lokalizace vývodu se zemním spojením	28
4.1.1	Lokalizace místa zemního spojení pomocí postupného vypínání úseků v síti vn	28
4.1.2	Lokalizace zemního spojení pomocí zkruhování sítě	28
4.2	Lokalizace v síti s uzemněným uzlem	28
4.3	Lokalizace v síti s kompenzací zemních kapacitních proudů	29
4.3.1	Lokalizace v síti s odporovým uzemněním uzlu	30
4.4	Lokalizace zemního spojení s využitím napětového kritéria.....	30
4.5	Lokalizace zemního spojení s využitím proudového kritéria.....	31
4.6	Možnosti využití HDO pro lokalizaci zemního spojení.....	33
4.7	Systém Swedish Neutral	35
4.7.1	Funkce systému za normálního provozu	36
4.7.2	Funkce při zemním spojení.....	36
4.7.3	Způsob lokalizace místa zemního spojení	36
4.7.4	Skokové ladění tlumivky	36
5	Praktický návrh kompenzačního zařízení.....	37
6	Závěr.....	39
	Seznam použité literatury.....	40

Úvod

V dnešní době k životu neodmyslitelně patří elektrická energie, na které jsme závislí. Energie je získávána z různých vyčerpatelných i nevyčerpatelných zdrojů a přeměňuje se na elektřinu. Než lze elektrickou energii využít v místě spotřeby, je třeba ji složitě dopravit z místa výroby do konečného místa spotřeby. Elektrická síť je rozlehlá a dochází v ní k mnoha nežádoucím jevům, jako je například zemní spojení.

Tento nežádoucí jev vzniká jak na holém venkovním vedení, tak i v kabelových sítích, kde ve většině případů zanechává horší následky. Dochází k němu v důsledku náhlých provozních změn, popřípadě stárnutím kabelů, které ztrácejí své izolační schopnosti. Nastat může také vlivem mechanického poškození vedení.

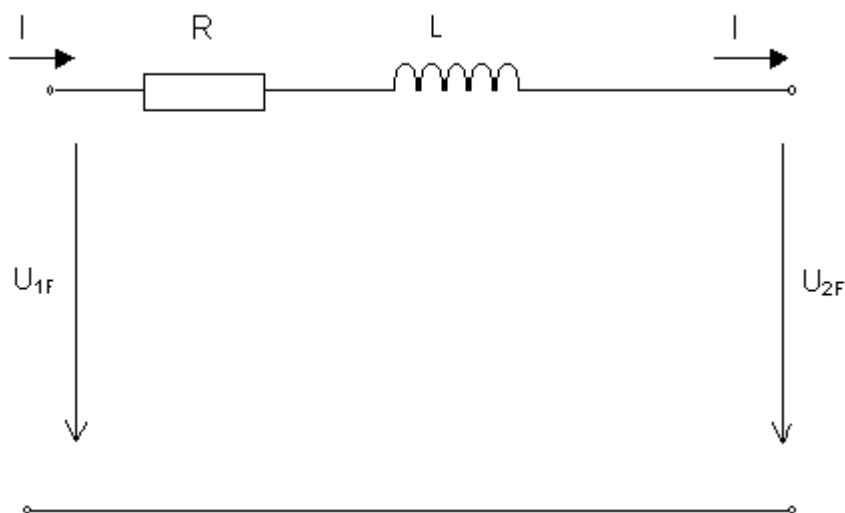
Vznikne-li zemní spojení, prochází místem poruchy kapacitní proudy, díky nimž dojde k zapálení oblouku, který je schopen poškodit kabel natolik, že dojde k totální ztrátě izolačních schopností a vznikne zkrat. Ten pak vypíná zkratové ochrany. My se však snažíme tomuto předejít a proto se snažíme kapacitní proudy kompenzovat.

Při samotné velikosti kapacity kabelů je kompenzace nutná. Po správném provedení bude místem poruchy protékat pouze malá složka činného proudu. Kompenzaci lze provádět různými způsoby v závislosti na parametrech sítě a podmínkách jejího provozu. Lze kompenzační prvky i kombinovat. Vše by mělo být v souladu s normou ČSN 33 3070, která tuto problematiku řeší. Dojde-li k zemnímu spojení, snažíme se omezit velikost kapacitních proudů, posléze o rychlou identifikaci a odstranění poruchy. Ne vždy je odstranění poruchy možné hned po vzniku, což řeší již zmíněné kompenzační prvky, které jsou dále popsány v této práci.

1 Popis kabelových sítí nn a vn

Základními parametry vedení jsou činný odpor R a indukčnost L . Tyto prvky počítáme u vedení s prostorově soustředěnými parametry, tedy u vedení nn a vn. V sítích vvn k těmto prvkům přibývá kapacita C , u vedení 400 kV a výše také počítáme se svodovou vodivostí G . V sítích řešených v této práci se svodová vodivost nevyskytuje, proto zde není uvedena.

V sítích nn a vn, které budeme popisovat, respektujeme parametry vedení R a L . Nahradíme vedení podélnou impedancí, která je tvořena vztahem $\bar{Z} = R + j\omega L$ [Ω]. Reálnou část tvoří činný odpor a imaginární tvoří induktivní reaktance ($X = \omega L$). Je možné použít jednofázový model. V trojfázovém vedení uvažujeme se symetrickým provozem. Tudíž poměry v každé fázi budou stejné, jen elektricky pootočené o 120° a 240°. U kabelových sítí nn lze někdy indukčnost zanedbat.



Obr.1.1 Náhradní schéma sítě vn

1.1 Parametry vedení

1.1.1 Činný odpor vedení

Činný odpor závisí na vodivém materiálu vedení, je přímo úměrný délce a měrnému odporu vedení. S rostoucím průřezem se odpor zmenšuje, je tedy nepřímo úměrný průřezu vedení.

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1.1)$$

R – odpor vedení [Ω]

S – průřez vedení [mm²]

l – délka vedení [m]

ρ – měrný odpor vodiče [Ω.mm².m⁻¹]

Činný odpor závisí na teplotě, proto se uvádí při teplotě 20 °C. Pro elektrovedné materiály platí, že se jejich odpor s teplotou zvyšuje a naopak. Teplotní součinitel odporu α zohledňuje tuto závislost.

$$R_{\vartheta} = R_{20} \cdot (1 + \alpha \Delta \vartheta) \quad (1.2)$$

R_{ϑ} – činný odpor při teplotě ϑ [Ω]

R_{20} – činný odpor při teplotě 20°C [Ω]

α – teplotní součinitel odporu [K^{-1}]

$\Delta \vartheta$ – teplotní rozdíl od 20°C

U vedení se střídavým napětím je činný odpor vyšší, je tedy frekvenčně závislý (skinefekt), můžeme říci, že střídavý odpor je větší než stejnosměrný.

$$R_{str} = k \cdot R_{ss} \quad (1.3)$$

V průmyslových kmitočtech můžeme napsat, že $k = 1$. Zvýšení odporu je zanedbatelné.

V elektrických sítích používáme především jako vodiče lana. Proto je použití základního vztahu problematické. Výrobce stanovuje hodnotu činného odporu vztaženou na jednotku délky, zpravidla na kilometr R_k . Pro odpor lana použijeme vztah:

$$R = R_k \cdot l \quad [\Omega; \Omega.km^{-1}; km] \quad (1.4)$$

Ohmický odpor země:

Protože v některých sítích je zem používána jako vodič elektrické energie, musíme stanovit její činný odpor.

$$R_z = \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4} \quad [Hz; \Omega.km^{-1}] \quad (1.5)$$

Pro u nás používaný kmitočet 50 Hz je tedy odpor země asi 0,05 $\Omega.km^{-1}$. Do této hodnoty nezapočítáváme přechodový odpor zemniců.

1.1.2 Indukčnost vedení

V okolí každého vodiče, kterým prochází elektrický proud, se vytváří elektromagnetické pole, které působí na okolí vodiče a vodič samotný. Proto vykazuje každé elektrické vedení také indukčnost.

U indukčnosti vedení rozlišujeme vlastní indukčnost vodiče a vzájemnou indukčnost mezi vodiči. Pro vlastní indukčnost vodiče odvodíme vztah, který je vztažen na jednotku délky. Většinou na kilometr.

$$L = 0,461 \log \frac{2l}{r} - 0,15 \quad [mH.km^{-1}] \quad (1.6)$$

Indexy l , r jsou parametry vodiče (délka, poloměr) a dosazujeme je ve stejných jednotkách. Pro vzájemnou indukčnost mezi vodiči, používáme vztah:

$$M = 0,46 \log \frac{2l}{a} - 0,2 \text{ [mH.km}^{-1}] \quad (1.7)$$

a – vzdálenost mezi vodiči

Hodnota permeability je zahrnuta v obou vztazích. Podle těchto vztahů, lze odvodit výslednou indukčnost určitého vedení.

1.1.3 Indukčnost kabelů

Kabel, který má stejné přenosové schopnosti jako venkovní vedení, má menší indukčnost. Vztah pro výpočet celkové střední indukčnosti u trojfázových venkovních vedení je:

$$L_{Cstř} = 0,46 \log \frac{a_s}{r} + 0,05 \text{ [mH.km}^{-1}] \quad (1.8)$$

$L_{Cstř}$ – indukčnost vedení na kilometr délky [mH.km⁻¹]

a_s – střední vzdálenost vodičů [m]

r – poloměr vodiče [m]

$a_s = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}} \text{ [m]}$

a_{12}, a_{13}, a_{23} – vzdálenost jednotlivých fází

Lze jej použít pouze u trojfázových plastových kabelů. Pro kabely s pancířem se stíněním a další platí složitější vztahy. Proto induktivní reaktanci na kilometr délky kabelu udává výrobce. Trojfázový kabel je jediný případ geometricky souměrného vedení. Indukčnost vedení je závislá na vzdálenosti vodičů. Jejich vzdálenost závisí na hladině napětí daného vedení. Poloměr vodiče r , který je uveden ve vzorci, se u vodičů z plného materiálu může počítat z průřezu drátu, u lan se tato hodnota uvádí v tabulkách. Jelikož u kabelů není splněna podmínka $a_s \gg r$ (a_s je vzdálenost jednotlivých fází, r jejich poloměr), jsou hodnoty, které vypočítáme, méně přesné než u venkovních vedení. Avšak pro technické účely jsou použitelné.

1.1.4 Kapacita kabelů

V okolí každého vodiče, kterým prochází elektrický proud, se vytváří elektromagnetické pole, které působí na okolí vodiče a vodič samotný. Proto má každé vedení také kapacitu. Vztah pro elektrický potenciál je základním vztahem při odvozování kapacity vedení.

$$U = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{\rho_0}{\rho} \quad [V; C \cdot m^{-1}; F \cdot m^{-1}] \quad (1.9)$$

U – potenciál [V]

Q – náboj vodiče [$C \cdot m^{-1}$]

ϵ – permitivita [$F \cdot m^{-1}$]

ρ – vzdálenost od vodiče [m]

ρ_0 – vzdálenost od vodiče, ve které předpokládáme nulový potenciál [m]

Kapacita kabelů je větší, než kapacita venkovního vedení stejné napětové hladiny a stejných přenosových schopností. I relativní permitivita izolace dosahuje vyšších hodnot než jedna. Vzorce pro výpočet kapacity kabelů jsou závislé na typu kabelu:

- s vlastním kovovým pláštěm pro jedno i vícežilové kabely
- se společným kovovým pláštěm pro všechny žíly u vícežilových kabelů
- kabely s celoplastovou izolací

Ad a) Kapacita těchto kabelů je tvořena pouze kapacitou proti plášti, tato kapacita je zároveň i jako kapacita provozní.

$$C_1 = \frac{0,024\epsilon_r}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad [\mu Fm; cm, m] \quad (1.10)$$

ϵ_r – poměrná permitivita izolace s kovovým obalem

r_1 – poloměr vodiče

r_2 – vnitřní poloměr kovové obálky

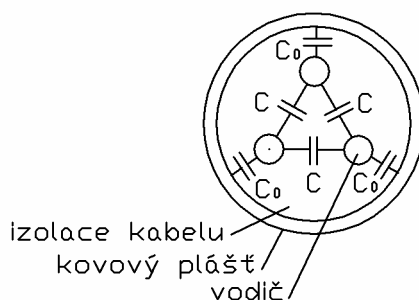


Obr.1.2 Průřez jednožilovým kabelem



Obr1.3 Průřez vícežilovým kabelem

Ad b) Tyto kabely nemají na každé žíle kovový obal, ale pouze společný kovový plášť pro všechny tři žíly. K provozní kapacitě se tedy přidávají další, jako je kapacita k plášti a vzájemné kapacity. Jsou pro všechny fáze stejné s přihlédnutím na geometrickou souměrnost kabelového vedení.



Obr. 1.4 Kapacitní schéma kabelu

Ad c) Celoplastové kabely nemají vodivý plášť, jejich kapacita je závislá podle uložení kabelu v zemi.

Kapacita těchto kabelů se dá zjistit měřením tzv. nabíjecího proudu. Do vedení naprázdno použijeme nabíjecí proud I_{NAB} . Můžeme říci, že kapacita kabelu závisí na vrstvení dielektrika, které je teplotně závislé, dále na druhu a typu kabelu. Kapacitu vedení udává vztah:

$$X_k \cdot l = \frac{U_f}{I_{NAB}} \quad (1.11)$$

$$C = \frac{I_{NAB}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot l \cdot U_f} \quad [\mu F/km; A, Hz, km, V] \quad (1.12)$$

I_{NAB} – nabíjecí proud [A]

f – kmitočet sítě [Hz]

l – délka vedení [km]

U_f – fázové napětí vedení [V]

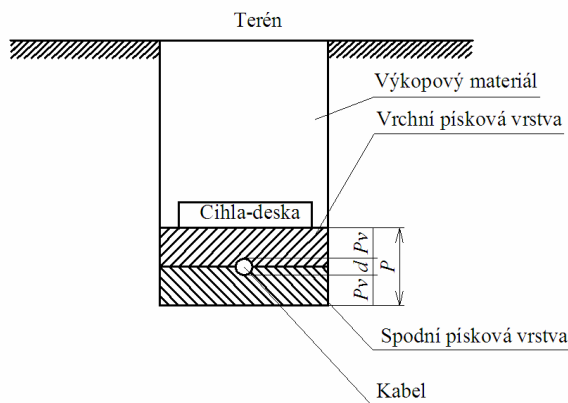
1.2 Kladení kabelových vedení

Kabely se v současné době používají ve všech hladinách napětí až do 110 kV. V sítích vn a vvn se převážně používají kabely jednožilové, při nižších hladinách napětí se používá kabelů vícežilových. Výhodou kabelových vedení je, že mají jednodušší mechanický návrh vedení než vedení venkovní. Největší problémy v mechanickém návrhu vznikají při kladení kabelu a to při řešení zajištění dostatečné hloubky a zamezení poškození při ohýbání. Další podmínkou je zabránění mechanickému poškození kabelu. Kladení silových elektrických vedení se řídí podle normy ČSN 33 2000-5-52.

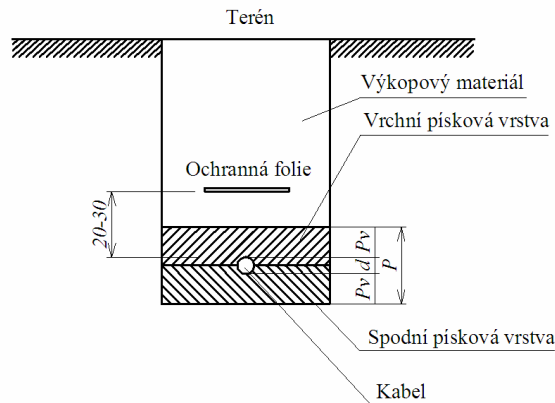
Kabely můžeme klást na rovný podklad, stěny, kabelové lávky, rošty, pod omítku, do tvárnic, kabelových kanálů, kolektorů a do země. Pod vodní hladinu klademe kabely, které svým obalem a izolací nezneškodní vodu. To jsou např. ty, které nemají jako obal olovo.

Kabely vkládáme do země podle Obr.1.6 tak, že do výkopu nasypeme vrstvu jemnozrnného písku o tloušťce nejméně 8 cm, na ni položíme kabel. Po položení zasypeme kabel po celé délce vrstvou stejné

tloušťky. Aby nedošlo k mechanickému poškození, chráníme kabely krycími cihlami, tvárnicemi, dlaždicemi apod. podle Obr.1.5. Tato krycí vrstva musí přesahovat přes kabel, nebo přes několik vedle sebe jdoucích kabelů, nejméně o 4 cm. Kabely do 1 kV v trasách, kde nehrozí jejich mechanické poškození, můžeme klást bez mechanických ochran, ale musíme kabel řádně označit výstražnou fólií z plastických hmot dle Obr.1.5.



Obr. 1.5 Kladení kabelů s ochranou zábranou



Obr. 1.6 Kladení kabelů bez ochranné vrstvy

Podle stupně nebezpečí mechanického poškození volíme druh obalu kabelu. V místech kde je zvýšené riziko mechanického poškození kabelu se musí kabely uložit do rour nebo kabelových kanálů. Hloubka ukládání kabelů je zapsána v tabulce Tab. 1. Kabely do 1 kV ukládáme do hloubky 35 cm při způsobu uložení podle Obr. 1.5 a 70 cm při uložení podle Obr 1.6. Při ohybu kabelu je třeba dbát na to, aby byl dodržen nejmenší dovolený poloměr ohybu na vnitřní straně ohýbaného kabelu dle Tab. 2, pokud sám výrobce nestanoví poloměr ohybu menší. Před zhotovením koncovek nebo spojek na konci kabelů musí být tyto chráněny před působením prostředí, např. chemickými vlivy, deštěm, vnikání vlhkosti.

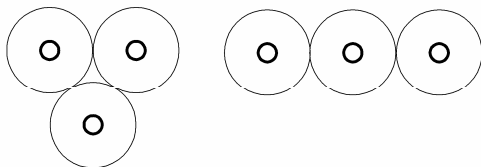
Tab. 1 Hloubka uložení kabelu do zemně

Napětí [kV]	Hloubka uložení [cm]		
	terén	chodník	vozovka
1	35 (70)	35	100
do 10	70	50	100
do 35	100	100	100
110	130	130	130

Tab. 2 Vnitřní poloměr ohybu kabelů

Vnější průměr kabelu d [mm]	Poloměr ohybu dle druhu izolace [cm]		
	pryžová	z plast. hmot	papírová
Do 20	5 d	6 d	-
20 – 40	7 d	12 d	15 d
přes 40	10 d	15 d	15 d
Kabely s Al pláštěm všech průměrů	15 d	15 d	15 d

Při ukládání více jednožilových kabelů do jednoho výkopu volíme uspořádání do trojúhelníku nebo vedle sebe v jedné rovině Obr. 1.7.



Obr. 1.7 Ukládání jednožilových kabelů

1.3 Vodiče pro venkovní vedení

Při volbě vodiče zohledňujeme elektrické i mechanické vlastnosti vedení. Často máme na vodič protichůdné nároky. Z hlediska dopravy a zatížení nosných částí vedení vyžadujeme hmotnost co nejmenší, ale z hlediska vlivu větru na vedení požadujeme hmotnost co největší. Dále chceme, aby byl průřez co nejmenší pro lepší odolnost proti působení námrazy a vlivu větru. Naopak pro zamezení rušení korunou vyžadujeme velký průřez. Vodič musí být chemicky odolný, mít velkou mechanickou pevnost, malý elektrický odpor a co nejmenší pořizovací náklady.

Nejčastěji se používají na elektrická venkovní vedení lana, dráty a závěsné kabely. U závěsných kabelů je podstatná odolnost izolace proti povětrnostním vlivům. Při výběru jakéhokoliv vodiče je důležité přihlížet i na okolní chemické vlivy, např. chemické továrny, hutě atd.

1.3.1 Použití vodičů, konstrukce a materiály

Přehled materiálů dovolených pro použití ve venkovních vedeních:

měď (Cu)

Používáme tvrdou a polotvrdou měď s pevností v tahu 400 MPa a 300 MPa. Měkká měď se smí používat pouze k vázání. Měď má malý odpor, nejmenší z používaných materiálů, na vzduchu je stálá, odolná proti atmosférickým a chemickým vlivům. Polotvrdá měď se smí používat pouze do 1kV.

hliník (Al)

Má 1,6 krát větší elektrický odpor než měď, menší měrnou hmotnost 0,3 krát a větší tepelnou roztažnost 1,4 krát. Hliník je na vzduchu stálý a odolný proti povětrnostním vlivům. Jeho pevnost v tahu je velmi malá, proto se musí používat v kombinaci se železem, např. AlFe lana. Vyrábí se z něj lana, dráty i kombinovaná lana.

slitiny hliníku (Al_d)

Slitiny hliníku se nejčastěji vyrábějí pro zlepšení mechanické pevnosti. Jako přísady se používají aldrej, jareal, atd. Nejpoužívanější je aldrej (98,7 % Al, 0,5 % Mg, 0,5 % Si, 0,3 % Fe)

ocel (Fe)

Má velký elektrický odpor, proto pro přenos elektrické energie není vhodná. Používá se s různými stupni pevnosti Fe 35 s pevností 350 MPa, dále pak Fe 50, Fe 70, Fe 130. Ocel na vzduchu není stálá, proto jí musíme dostatečně chránit proti korozi. Nejčastější způsob ochrany je pozinkování. V elektrotechnice se ocel používá především jako nosná část kombinovaných lan ALFe, kotevní lana a zemnicí lana.

jiné materiály

užívají se pouze po prověření v autorizované zkušebně. Používá se bronz, slitina Cu, Sn s přísadou P a Si pro speciální účely.

1.3.2 Rozdělení z hlediska konstrukce vodiče u venkovních vedení

dráty

používají se do hladiny napětí 1 kV. Materiály: Cu, Al, Hliník lze použít pouze u závěsných kabelů.

Omezení průřezu vodičů: Cu 6 – 25 mm²
 Al 16 – 25 mm²

lana prostá

používají se pro silová vedení všech napětí. Lana z polotvrdé mědi pouze do 1 kV, používaný materiál Cu, Al, AlFe. Výroba lan se provádí zakrucováním jednotlivých pramenů do sebe. Takto se vytvoří několik vrstev, každá vrstva se kroutí jiným směrem, aby nedošlo k rozplétání vodiče. Lano má oproti drátu větší elektrický odpor, větší hmotnost, menší pevnost, menší indukčnost a modul pružnosti.

lana kombinovaná

skládají se ze dvou materiálů. Materiál uvnitř vodiče má větší mechanickou pevnost, tvoří nosnou část lana – duše. Zpravidla se používá ocel Fe. Po obvodu lana je materiál s velkou elektrickou vodivostí sloužící, jako elektrovodná část lana – plášť. Běžně se používá kombinace hliníku s ocelovou duší – AlFe a slitiny s hliníku s Fe duší. Značení těchto lan se skládá z označení materiálu a číslice např. AlFe 8, kdy číslice vyjadřuje zaokrouhlený poměr průřezu pláště a duše v laně.

svazkové vodiče

převážně se používají u vedení vvn. Vodič jednotlivých fází tvoří několik vedle sebe jdoucích lan. Touto metodou se docílí snížení povrchového gradientu, tím se sníží vliv korony u vvn. Vodič ve svazku o poloměru r s n vodiči se chová jako ekvivalentní jednoduchý vodič o průměru:

$$d_a = \sqrt[n]{r \cdot d_{12} \cdot d_{13} \dots \cdot d_{1n}} \text{ [cm]} \quad (1.13)$$

kde d_{1n} je vzdálenost vodiče 1 a n ve svazku.

Rozdíl mezi svazkovými a jednoduchými vodiči je v tom, že svazkové vodiče mají větší provozní kapacitu, menší provozní indukčnost, jsou více proudově zatížitelné, mají menší náchylnost ke kmitání, větší pořizovací náklady a větší náročnost při instalaci.

závěsné kabely

požívají se v sítích nn, převážně pro domovní přípojky. Závěsný kabel je tvořen klasickým kabelem s vodiči z hliníku, ten je s nosným ocelovým lanem spojen společnou izolací. Tyto kabely se značí, jako AYKYz 4x16, kde AYKY je kabel, jeho vodiče a druh zvolených izolací jednotlivých vodičů a plášť kabelu a „z“ označuje závěsné lano. První číslice značí počet vodičů a druhá jejich průřez. Tyto kabely mají nejmenší dovolený průřez 10 mm².

samonosné kabely

používají se v sítích nn a vn, nejčastěji v sítích nn kde se pro průmyslový rozvod používá kabel se čtyřmi vodiči a pro rozvod veřejného osvětlení kabel se dvěma vodiči. Značení těchto kabelů je např. AES 4x16. Tyto kabely mají pouze izolaci jednotlivých vodičů, které jsou do sebe zatočeny. Jelikož jsou všechny vodiče černé, provádí se rozlišení fází počtem podélných drážek na izolaci.

1.3.3 Hladiny napětí

Tab. 3 Rozdělení napěťových hladin

Napětí	Hladiny sdružených napětí					
	Malé (mn)	Nízké (nn)	Vysoké (vn)	Velmi vysoké (vvn)	Zvlášť vysoké (zvn)	Ultra vysoké (uvn)
ss	120 V	1,5 kV	nad 1,5 kV	-	-	-
st	50 V	600 V	52 kV	300	800	nad 800

Pro zjednodušení se hladiny napětí sjednotily na normalizované hodnoty jmenovitých napětí podle normy ČSN 33 0120, stalo se tak z provozních a hospodářských důvodů. Uvedeme zde nejčastěji používané napětí.

Jednofázová střídavá napětí 50 Hz

2, 4, 6, 12, 24, 42, 48, 60, 110, 230

Trojfázová střídavá napětí troj – a čtyřvodičových soustav:

400/230, 500, 690/400 a 1000 V

3, 6, 10, 15, 22, 35, 110, 220, 400, 750 kV pozn.(v česku se jmenovité napětí 750 kV nepoužívá)

Uvedená napětí jsou mezi fázovými vodiči, tedy sdružená. Běžně se v přenosových a distribučních sítích používají tato napětí:

400/230 V	venkovní i kabelové sítě
500 V	průmyslové rozvody
6, 10, 22 kV	kabelové sítě
22, 35, 110, 220, 400 kV	venkovní sítě a vedení

Sítě, které zde nejsou uvedeny, se nadále nerozšiřují a po ukončení životnosti se neobnovují.

2 Teoretický rozbor vzniku zemního spojení

2.1 Popis zemního spojení

Vodivé spojení jedné fáze v trojfázových sítích s přímo uzemněným uzlem nazýváme zkrat. Ovšem v sítích, které mají nepřímo uzemněný uzel nebo jsou kompenzovány se toto spojení nazývá zemním spojením. Kompenzovaná síť je taková, která má uzel spojený se zemí přes zhášecí tlumivku nebo je vytvořen umělý uzel přes zášecí transformátor. Proud procházející místem zemního spojení není oproti zkratovým proudům závislý na vzdálenosti od zdroje. Je nejvíce ovlivňován kapacitami vodičů proti zemi. U přechodných jevů je dán dokonce i indukčností a odpory v obvodu zemního spojení. Proud který prochází místem zemního spojení je kapacitního charakteru a mnohem menší než proudy, které protékají místem poruchy při zkratu. Většinou bývají zkratové proudy několika násobně větší než jmenovité (provozní) proudy a jsou indukčního charakteru.

U rozsáhlejších sítích přesahuje hodnota poruchového proudu hranici 5 A. V tomto případě dojde k zapálení oblouku, který je schopen dosáhnout velkých délek. Skoro vždy dosáhne sousední fáze, a tím se zemní spojení změní na dvoj nebo troj- fázové zkraty. Důsledkem vzniku oblouku je také přepálené vedení, poškozené dřevěné stožáry a poničené izolátory.

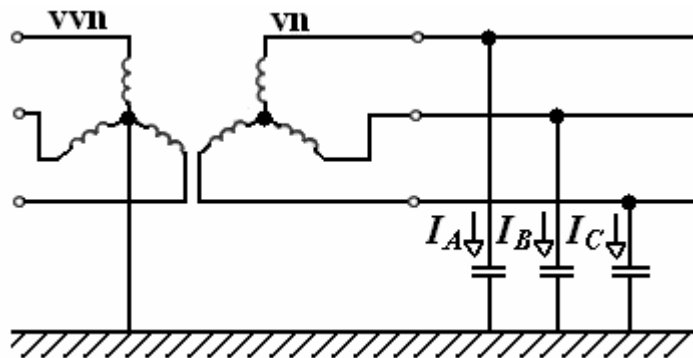
Zemní spojení je porucha, při které můžeme síť nadále provozovat, musíme však tyto sítě kompenzovat. Toho docílíme různými způsoby propojení uzlu se zemí. Připojením uzlu sítě k zemi změní u symetrických sítí v bezporuchovém stavu nedosáhneme, ale pokud dojde k zemní poruše při nesymetrii soustavy nebo k přechodným jevům nastanou změny především ve velikosti a charakteru proudů zemních spojení, provozních vlastností a napětí proti zemi. V našich rozvodných sítích používáme čtyři druhy spojení uzlu se zemí. Sítě vn menšího rozsahu, které se nejčastěji vyskytují v průmyslových závodech, v teplárnách a ve vlastních spotřebách elektráren, provozujeme s izolovaným uzlem. V těchto případech dochází k samočinnému odpojení dané části sítě, na které se vyskytne porucha izolace jedné fáze proti zemi.

Výhodnějším a rozšířenějším způsobem v distribučních sítích vn je spojení uzlu sítě se zemí přes zhášecí tlumivku. Tento způsob zapojení umožňuje udržet v provozu i rozsáhlejší síť se zemním spojením, což je dobré pro získání potřebného času k nalezení místa poruchy.

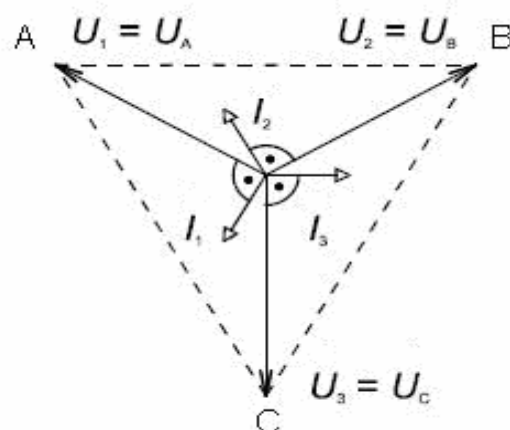
V kabelových sítích, kde počet přechodných poruch není tak častý, dochází ke změně trvalých zemních spojení ve zkraty. Je třeba docílit rychlého vypnutí zemního spojení, pro tyto účely se používá spojení uzlu přes rezistor. Ten můžeme někdy kombinovat se zhášecí tlumivkou ve smíšených sítích, jedná se o krátkodobé uzemnění uzlu přes rezistor. Používá se jen v malé míře, rezistor se připojí paralelně k tlumivce a tím se zvýší poruchový proud zemního spojení což vytvoří podmínky pro rychlý naběh ochrany postižené části sítě. Důvod omezeného používání jsou vysoké investiční náklady z důvodů použití dvou komponentů (omezující odpor, zhášecí tlumivka), spínacích a ovládacích prvků.

Při přerušování zemním spojením, dochází k přepětí v síti. K uhasínání a opětovnému zapalování oblouku dochází při přerušování zemním spojením, důsledkem toho je výše zmiňované přepětí na nepostižených fázích, které dosahuje 4 až 4,5 násobku U_f (fázového napětí).

Sítěmi s izolovaným uzlem prochází kapacitami k zemi kapacitní proudy, které když sečteme při symetrické síti a symetrickém napětí v ustáleném stavu, dostaneme nulovou hodnotu. (viz Obr. 1.8)



Obr. 1.8 Schéma izolované sítě



Obr. 1.9 Fázorový diagram napětí a proudu

Při spojení jedné z fází se zemí se zemní kapacitní proudy zdravých fází uzavírají přes zem a vinutí transformátoru. Proudů v rozsáhlejších sítích dosahují značných velikostí. Sít' může být ponechána v provozu, pokud tyto proudy nepřekročí stanovenou mez.

2.2 Rozdělení zemních spojení

Podle doby trvání rozlišujeme:

mžiková zemní spojení – do 0,5 s

krátkodobá zemní spojení – do 5 min

přerušovaná zemní spojení – kombinace předchozích dvou spojení opakujících se vícekrát za sebou.

trvalá zemní spojení – zpravidla až do odstranění poruchy (několik hodin)

Podle přechodného odporu v místě spojení rozlišujeme:

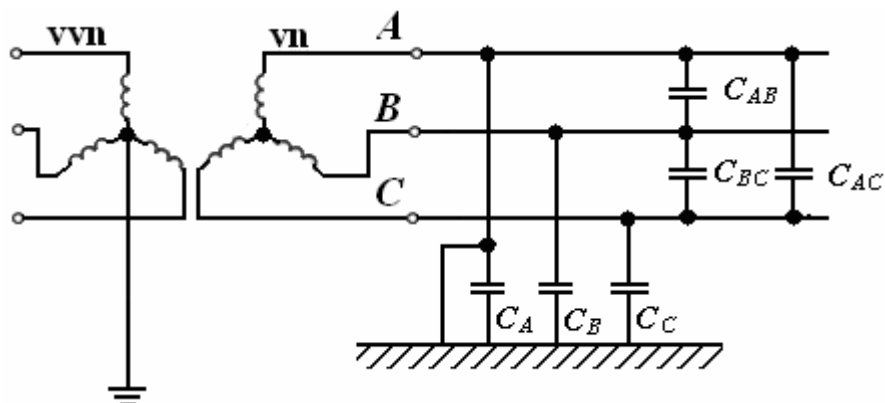
zemní spojení oblouková a kovová – hodnoty odporu dosahují jen několik Ω

zemní spojení odporové – hodnoty přechodového odporu dosahují hodnot několik set Ω

2.3 Přerušované zemní spojení v síti s izolovaným uzlem

Je to spojení, které nekončí průchodem proudu nulou, pouze uhasne a opět se zapálí. Spojí-li se jedna z fází se zemí, začne se odehrávat přechodný jev, po jehož ukončení je napětí postižené fáze nulové a napětí dvou zbylých fází vzrostou na sdruženou hodnotu napětí.

Při změně z ustáleného bezporuchového stavu do ustáleného stavu zemního spojení má přechodný děj kmitavý charakter. Tyto kmity procházejí celou sítí, jejich frekvenci udávají parametry sítě, především indukčnosti, kapacity celé sítě a napájecích transformátorů. Indukčnosti venkovních a kabelových vedení můžeme zanedbat.



Obr. 2.1 Schéma sítě s izolovaným uzlem se zemním spojením

Transformátor na obrázku představuje napěťový zdroj a zastupuje všechny transformátory, které dodávají energii do dané části sítě. Na fázi A vznikne zemní spojení. Při spojení této fáze se zemí, dojde ke zkratování kapacity C_A a kapacity ostatních dvou fází C_B , C_{AB} , C_C , C_{AC} jsou spojeny paralelně. V symetrických sítích platí:

$$C_A = C_B = C_C = C \quad (2.1)$$

$$C_{AB} = C_{AC} = C_{BC} = C' \quad (2.2)$$

Paralelními kombinacemi kapacit C_B , C_{AB} a C_C , C_{AC} , dostaneme výslednou kapacitu:

$$C_{eB} = C_{eC} = C_e = C + C' \quad (2.3)$$

Můžeme předpokládat, že zemní spojení fáze A nastalo v okamžiku průchodu napětí maximální hodnotou

$$u_{A[0]} = u_m \quad (2.4)$$

přičemž u_m je amplitudou sinusovky fázového napětí. Kapacity C_B a C_C měly v tomto okamžiku napětí podle okamžitých hodnot fázových napětí.

$$u_{B[0]} = u_{C[0]} = -0,5u_m \quad (2.5)$$

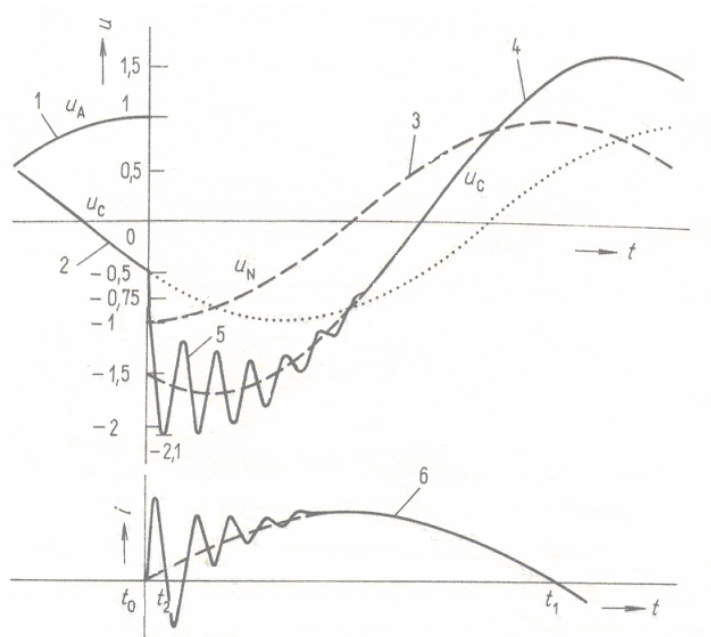
a na kapacitách mezi fázemi B a C a zasaženou fází A je napětí dáno okamžitými hodnotami napětí

$$u_{BA[0]} = u_{CA[0]} = -0,5u_m - u_m = -1,5u_m \quad (2.6)$$

Při vzniku zemního spojení mají kapacity C a C' různá napětí, když dojde k jejich paralelnímu sepnutí, díky indukčnosti napájecího transformátoru se jejich celkový náboj nemůže okamžitě změnit. Proto výsledné napětí na kapacitě C_e můžeme napsat

$$\begin{aligned} u_{eBo} = u_{eCo} &= \frac{Q_e}{C_e} = \frac{Q_{Co} + Q'_{Co}}{C + C'} = \frac{Q_{C[0]} + Q'_{C[0]}}{C + C'} = \\ &= \frac{-0,5u_m C - 1,5u_m C'}{C + C'} = -\frac{C + 3C'}{2(C + C')} u_m \end{aligned} \quad (2.7)$$

Kapacity C a C' bývají v poměru $C = 3$ až $4 C'$. Zvolíme $C = 3C'$ a pro napětí u_{eo} dostaneme z (tehle rovnice) $u_{eo} = -0,75u_m$



Obr. 2.2 Průběh napětí při vzniku zemního spojení

Ustálený stav, který vznikne má průběh napětí $u_C(t)$ určuje jej elektromotorické napětí zdroje. Toto napětí je součtem napětí napájecího uzlu transformátoru a původní fázové sinusovky napětí Obr. 2.1.

Znázorněná fáze C :

křivka 2 – původní u_C

křivka 3 – napětí uzlu N

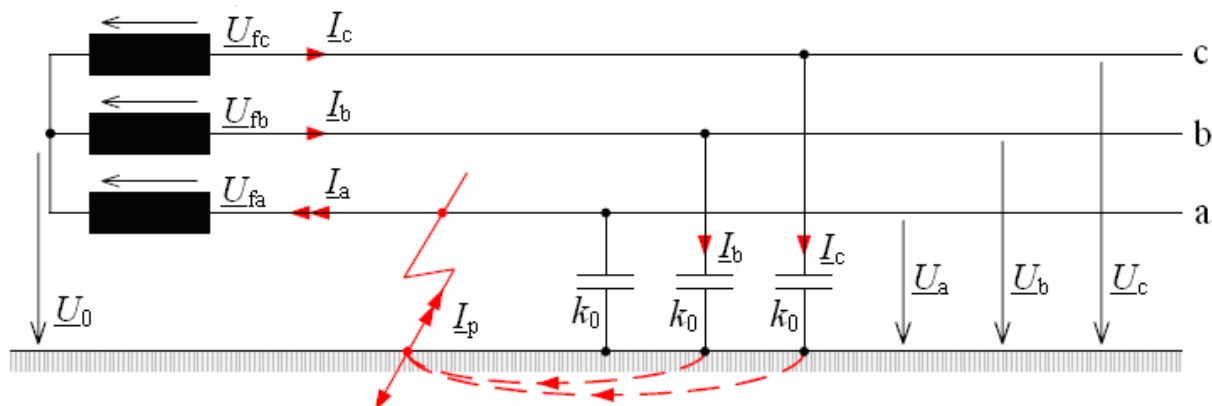
křivka 4 – napětí u_C

křivka 5 – přechodná složka napětí

křivka 6 – průběh proudu zemního spojení

2.4 Trvalé zemní spojení v síti s izolovaným uzlem

Při dokonalém (kovovém) zemním spojení bude schéma souměrné sítě vypadat takto:



Obr. 2.3 Zemní spojení v souměrné síti

Můžeme napsat, že poruchový proud se skládá ze dvou proudů, které tečou kapacitami zdravých fází. Kapacita postižené fáze je vyřazena poruchou. Lze tedy napsat vtahy:

$$\underline{I}_p = \underline{I}_a = \underline{I}_b + \underline{I}_c \quad (2.8)$$

$$\underline{U}_a = 0 \quad (2.9)$$

$$\underline{I}_b = j\omega k_0 \underline{U}_b \quad (2.10)$$

$$\underline{I}_c = j\omega k_0 \underline{U}_c \quad (2.11)$$

$$\underline{U}_a - \underline{U}_0 - \underline{U}_{fa} = 0 \quad (2.12)$$

$$\underline{U}_b - \underline{U}_0 - \underline{U}_{fb} = 0 \quad (2.13)$$

$$\underline{U}_c - \underline{U}_0 - \underline{U}_{fc} = 0 \quad (2.14)$$

Z uvedených rovnic vyplývá: rovnice (2,9) – vznikne-li dokonalé spojení, napětí klesne na nulu.

Rovnice (2,12) – napětí na uzlu transformátoru se změní na zápornou hodnotu napětí postižené fáze.

$$\underline{U}_0 = -\underline{U}_{fa} \quad (2.15)$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_0 + \underline{U}_{fb} = (-1 + a^2) \underline{U}_{fa} = -\sqrt{3} e^{j30^\circ} \underline{U}_{fa} \quad (2.16)$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_0 + \underline{U}_{fc} = (-1 + a^2) \underline{U}_{fa} = -\sqrt{3} e^{-j30^\circ} \underline{U}_{fa} \quad (2.17)$$

Napětí zdravých fází proti zemi stoupnou na sdruženou hodnotu, při dokonalém zemním spojení.

Rovnice 2.8, 2.10, 2.11 udávají poruchový proud v síti:

$$\underline{I}_p = \underline{I}_b + \underline{I}_c = j\omega k_0 (\underline{U}_b + \underline{U}_c) \quad (2.18)$$

Z rovnic 2.16, 2.17 dosadíme za \underline{U}_b a \underline{U}_c :

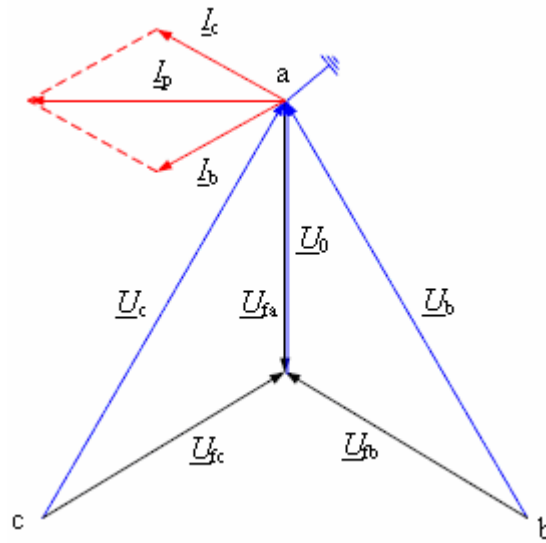
$$\underline{I}_p = j\omega k_0 \left[(-1 + \underline{a}^2) + (-1 + \underline{a}) \right] \underline{U}_{fa} \quad (2.19)$$

Po úpravách obdržíme poruchový proud:

$$\underline{I}_p = j\omega k_0 (-2 + \underline{a}^2 + \underline{a} + 1 - 1) \underline{U}_{fa} \quad (2.20)$$

$$\underline{I}_p = -3j\omega k_0 \underline{U}_{fa} = 3j\omega k_0 \underline{U}_0 \quad [A; s^{-1}, F, V] \quad (2.21)$$

Napětí uzlu soustavy je předbýváno poruchovým proudem o $\pi/2$, ten je součtem kapacitních proudů zdravých fází. Zpravidla jej označujeme jako kapacitní proud sítě, považujeme jej za měřítko, podle kterého určíme rozsáhlost a způsob provozu sítě.



Obr. 2.4 Napěťové a proudové poměry v síti při zemním spojení

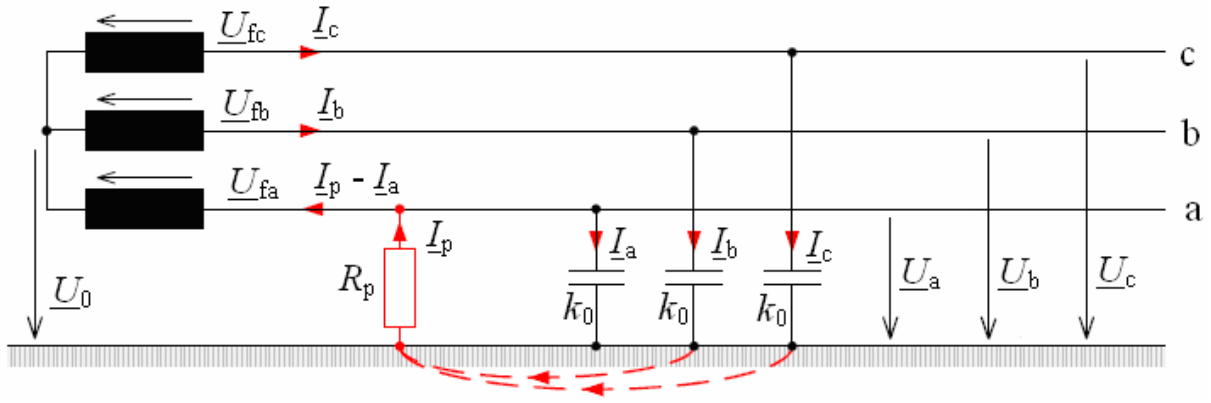
Poruchový proud \underline{I}_p závisí na rozlehlosti sítě, která je připojena k transformátoru. Za kapacitu k_0 [F] můžeme dosadit $k_0 = k_{01} \cdot l$ [F; F/km, km].

$$I_p = 3\omega k_0 l U_f \quad [A; s^{-1}, F/km, km, V] \quad (2.22)$$

Měrné kapacity jsou v kabelových sítích mnohonásobně větší než ve venkovních vedeních, k tomu jsou závislé na průřezu jader vodičů a druhu izolace. Kapacitní proud ve venkovních sítích 22 kV je 0,063 A/km. Můžeme říci, že pro kabely 22 kV s hodnotou průřezu mezi 120 a 240 mm² s papírovou izolací se hodnota měrných kapacitních proudů pohybuje okolo 3,5 až 4,5 A/km.

2.5 Odporové zemní spojení

Je to nedokonalé zemní spojení, hodnota přechodového odporu v místě poruchy je značně velká, několik stovek Ω viz. Obr. 2.6



Obr. 2.5 Odporové zemní spojení

V tomto případě je tedy napětí postižené fáze vůči zemi nenulové a pro poruchový proud můžeme napsat:

$$\underline{I}_p = \frac{\underline{U}_a}{R_p} = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c \quad (2.23)$$

Pro odvození rovnic napětí uzlu proti zemi lze použít rovnice z bezporuchového stavu sítě. Postupně násobíme $j\omega k_{a0}$, $j\omega k_{b0}$, $j\omega k_{c0}$ a potom sečteme. Výsledný vztah je:

$$j\omega(k_{a0}\underline{U}_a + k_{b0}\underline{U}_b + k_{c0}\underline{U}_c) - j\omega(k_{a0} + k_{b0} + k_{c0})\underline{U}_0 - j\omega(k_{a0}\underline{U}_{fa} + k_{b0}\underline{U}_{fb} + k_{c0}\underline{U}_{fc}) = 0 \quad (2.24)$$

Poruchovému proudu \underline{I}_p je roven první člen rovnice. Vyjádříme-li napětí postižené fáze $\underline{U}_a = \underline{U}_0 + \underline{U}_{fa}$ dostaneme vztah pro napětí uzlu při odporovém zemním spojení:

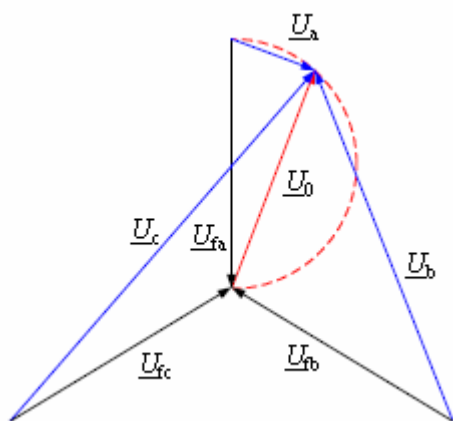
$$\underline{U}_0 = -\frac{j\omega(k_{a0} + k_{b0} + k_{c0}) + R_p^{-1}}{j\omega(k_{a0} + k_{b0} + k_{c0}) + R_p^{-1}} \underline{U}_{fa} \quad (2.25)$$

$R_p = 0$ zemní spojení bez přechodového odporu, kdy $\underline{U}_0 = -\underline{U}_{fa}$.

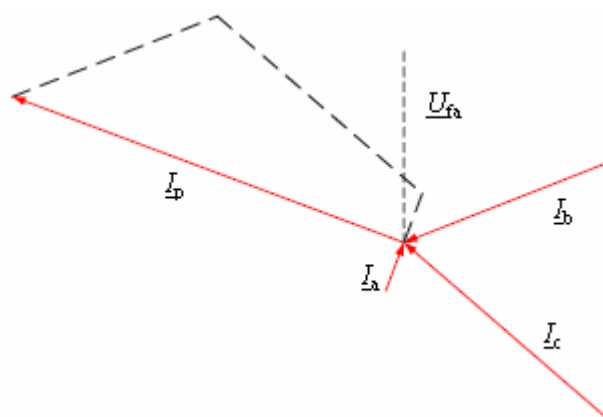
$R_p = \infty$ normální stav, bez závady, kdy $\underline{U}_0 = 0$ pouze při kapacitně symetrické síti.

Poruchový proud vyjádříme:

$$\begin{aligned} \underline{I}_p &= \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = j\omega(k_{a0}\underline{U}_a + k_{b0}\underline{U}_b + k_{c0}\underline{U}_c) \\ \underline{I}_p &= j\omega(\underline{U}_a + \underline{U}_b + \underline{U}_c) = j\omega k_0 [3\underline{U}_0 (\underline{U}_{fa} + \underline{U}_{fb} + \underline{U}_{fc})] \\ \underline{I}_p &= 3j\omega k_0 \underline{U}_0 = -3j\omega k_0 \underline{U}_0 \frac{R_p^{-1}}{3j\omega k_0 + R_p^{-1}} \end{aligned} \quad (2.26)$$



Obr. 2.6 Fázorový diagram napětí při odporovém odporovém zemním spojení



Obr. 2.7 Fázorový diagram proudu při zemním spojení

3 Možnosti kompenzace zemních kapacitních proudů

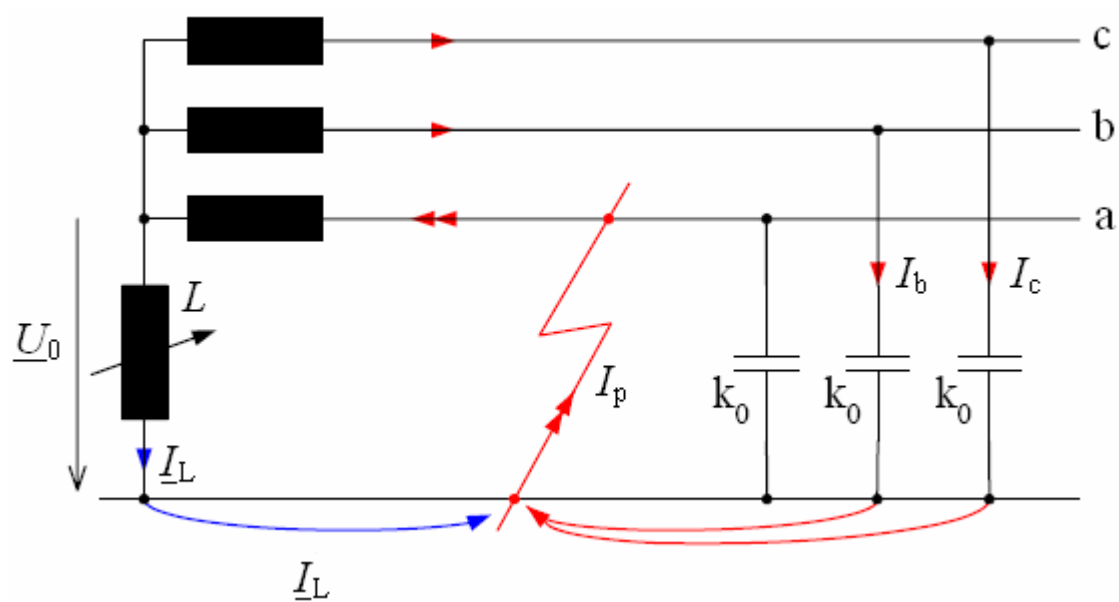
3.1 Nepřímo uzemněná síť přes zhášecí tlumivku.

Kompenzaci sítí vn doporučujeme od hodnoty 5 A zemních poruchových proudů a nad 10 A je kompenzace nutná. Nejčastěji používaným způsobem kompenzace je uzemnění uzlu transformátoru přes plynule regulovatelnou zhášecí tlumivku. Zemní proud se po vykompenzování kapacitního proudu skládá z činné složky nabíjecího proudu, svodu, činné složky proudu tlumivky a proudů harmonických. Pokud docílíme dokonalé kompenzace, bude mít zbytkový proud pouze činnou složku. Při nedokonalé kompenzaci přibude k činnému proudu ještě jalový, jeho charakter závisí na tom, je-li síť překompenzovaná nebo podkompenzovaná. Při překompenzované síti je jalový proud induktivního charakteru a při podkompenzované síti má charakter kapacitní. Zbytkový proud je u dosažení dokonalé kompenzace závislý na celkové kapacitě sítě (závisí na velikosti sítě), dále na provozním napětí a svodu, ten je ovlivněn stářím a kvalitou údržby sítě. Kapacitní složku zemního proudu jsme schopni úplně odstranit při správném nastavení tlumivky, ale činnou složku proudu nelze kompenzací zmenšit, spíše se vlivem indukčního kompenzačního proudu o trochu zvětší.

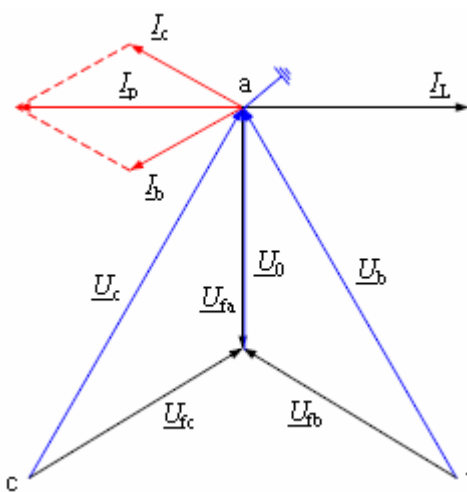
Za normálního provozu v souměrné síti je napětí uzlu transformátoru $\underline{U}_0 = 0$, při nesymetriích v běžném provozu bývá napětí uzlu $\underline{U}_0 < 0,01 U_f$. Napětí uzlu při dokonalém zemním spojení je $\underline{U}_0 = -\underline{U}_{fa}$. V tomto případě bude proud tekoucí ideální zhášecí tlumivkou zpožděn o $\pi/2$ za napětím \underline{U}_0 :

$$I_L = -j \frac{\underline{U}_0}{\omega L} \quad (3.1)$$

Pokud zvolíme dobré nastavení indukčnosti L , kapacitní zemní proudy se vykompenzují. K uhašení oblouku dojde, protože induktivní proudy zhášecí tlumivky jsou v protifázi s kapacitními proudy zdravých fází.



Obr. 3.1 Zapojení zhašecí tlumivky v síti



Obr. 3.2 Princip kompenzace zemních spojení

Při dokonalé kompenzaci můžeme napsat:

$$\underline{I}_L = -\underline{I}_p \quad (3.2)$$

s použitím rovnice (2.22):

$$-j \frac{\underline{U}_0}{\omega L} = -3j \omega k_0 \underline{U}_0 \quad (3.3)$$

Z této rovnice vyplývá potřebný vztah pro indukčnost ideální zhašecí tlumivky:

$$L = \frac{1}{3\omega^2 k_0} \quad [H; s^{-1}, F] \quad (3.4)$$

Zdánlivý výkon zhášecí cívky určíme ze vztahu:

$$\underline{S} = \underline{U}_0 \underline{I}_L^* = j \frac{\underline{U}_0 \underline{U}_0^*}{\omega L} = j 3 \omega k_0 U_0^2 = j 3 \omega k_0 U_f^2 = j 3 \omega k_0 U^2 \quad [VA; s^{-1}, F, V] \quad (3.5)$$

$U(V)$ je sdružené napětí sítě. Jalový výkon je indukčního charakteru:

$$Q = \omega k_0 U^2 \quad [VAR; s^{-1}, V] \quad (3.6)$$

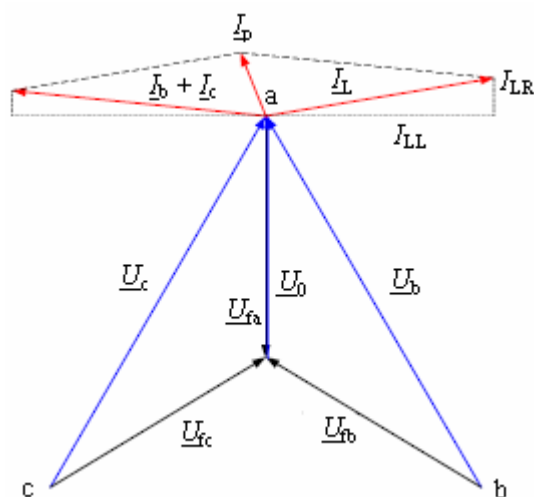
Oblouk se při ideální kompenzaci neudrží a zhasne, protože místem poruchy neteče žádný proud. V reálných případech protéká místem poruchy zbytkový proud. Je obsažen nevykompenzovanou činnou složkou, kterou tvoří činný odpor tlumivky a svod vedení, dále nevykompenzovaným proudem vlivem nepřesného nastavení indukčnosti a také proudy vyšších harmonických. Pokud docílíme toho, aby zbytkový proud procházející místem poruchy byl menší než 5 A, oblouk uhasne vlivem deionizace jeho dráhy sám. Pro tento proud můžeme napsat vztah:

$$\underline{I}_p = \left[\frac{1}{R_L} + 3G_0 + j \left(3\omega k_0 - \frac{1}{\omega L} \right) \right] \underline{U}_0 \quad (3.7)$$

R_L – odpor tlumivky

G_0 – svodový odpor jedné fáze vedení

Zbytkový proud tekoucí po kompenzaci je znázorněn ve fázorovém diagramu:

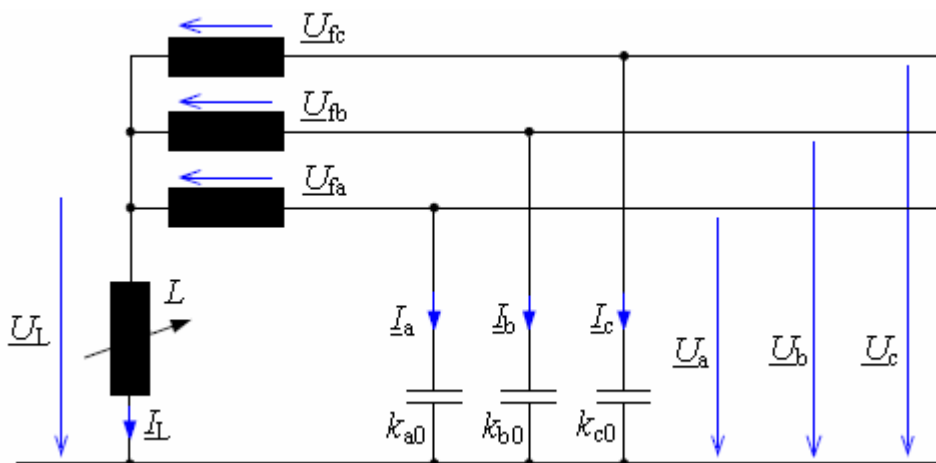


Obr. 3.3 Fázorový diagram se zbytkovým proudem

Zbytkový proud (poruchový), při dobře naladěné tlumivce má činný charakter a je menší než kapacitní proudy sítě. Výrazně se zlepšují podmínky pro samozhášení u obloukových zemních poruch, nedochází k opětovným zápalům s pozvolným narůstáním napětí v postižené fázi. Snižují se také nároky na uzemnění sítě, díky nižším hodnotám poruchového proudu.

3.1.1 Ladění zhášecí tlumivky

Při návrhu a volbě určíme výpočtem vhodnou indukčnost zhášecí tlumivky. Dále pak provádíme nastavení tlumivky v bezporuchovém provozu daného vedení. Při změně velikosti vedení nebo přidávání a ubírání větví je nutno tlumivku přeladit. Změnu indukčnosti provádíme plynule regulací magnetického obvodu elektromotorem ovládaným dálkově nebo ručně. Dříve se tato regulace prováděla odbočkami z cívky, tedy skokově.



Obr. 3.4 Připojení zhášecí tlumivky do uzlu trojfázové sítě

Z obrázku plynou rovnice:

$$\underline{U}_L = j\omega L \underline{I}_L \quad (3.8)$$

$$\underline{U}_a - \underline{U}_L - \underline{U}_{fa} = 0 \Rightarrow \underline{U}_a = \underline{U}_{fa} + \underline{U}_L \quad (3.9)$$

$$\underline{U}_b - \underline{U}_L - \underline{U}_{fb} = 0 \Rightarrow \underline{U}_b = \underline{U}_{fb} + \underline{U}_L \quad (3.10)$$

$$\underline{U}_c - \underline{U}_L - \underline{U}_{fc} = 0 \Rightarrow \underline{U}_c = \underline{U}_{fc} + \underline{U}_L \quad (3.11)$$

$$-\underline{I}_L = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = j\omega(k_{a0}\underline{U}_a + k_{b0}\underline{U}_b + k_{c0}\underline{U}_c) \quad (3.12)$$

Dosaďme do rovnice (3.12) z rovnic (3.9), (3.10), (3.11) dostaneme:

$$-\underline{I}_L = j\omega[(k_{a0} + k_{b0}a^2 + k_{c0}a^2)\underline{U}_{fa} + (k_{a0} + k_{b0} + k_{c0})\underline{U}_L] \quad (3.13)$$

Podle rovnice (3.8)

$$\underline{I}_L = \frac{\underline{U}_L}{j\omega L} \quad (3.14)$$

Srovnáním rovnic a úpravou dostaneme:

$$-\underline{U}_L = -\omega^2 L(k_{a0} + k_{b0}a^2 + k_{c0}a^2)\underline{U}_{fa} - \omega^2 L(k_{a0} + k_{b0} + k_{c0})\underline{U}_L \quad (3.15)$$

$$\underline{U}_L = \frac{-\omega^2 L(k_{a0} + a^2 k_{b0} + \underline{a} k_{c0})}{\omega^2 L(k_{a0} + k_{b0} + k_{c0}) - 1} \underline{U}_{fa} \quad (3.16)$$

Abychom dosáhli dobrých účinků kompenzace na samozhášení poruch i na omezení velikosti přepětí a dimenzování uzemnění, musíme po nastavení zhášecí tlumivky udržovat rozdíl proudů I_{Lnast} a kapacitního proudu sítě I_{kap} tak, aby rozdíl nepřesáhl 10% kapacitního proudu sítě:

$$|I_{Lnast} - I_{kap}| \leq 0,1 I_{kap} \quad (3.17)$$

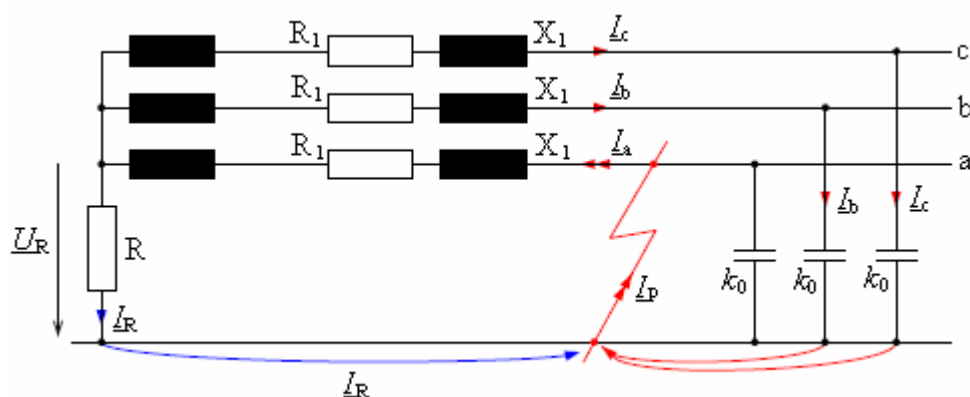
Zhášecí tlumivky většinou připojujeme k uzlu napájecích transformátorů. Pokud tyto transformátory nemají vyvedený uzel, připojuje se zhášecí tlumivka přes uměle vyvedený nulový bod pomocí nulové trojfázové tlumivky nebo pomocného transformátoru $Y_N/d1$.

3.2 Nepřímo uzemněná síť přes odpor

Síť s odporem se většinou používá v kapacitně souměrných sítích (městské kabelové sítě), kde je obtížné naladit zhášecí tlumivku. Ta také není schopna omezit přepětí vzniklé na zdravých fázích vlivem zemního spojení, což namáhá izolaci těchto vodičů a zvyšuje riziko vzniku vícenásobných zemních spojení. Další výhodou použití odporu je úspora prostoru proti použití zhášecí tlumivky.

Oproti tomu je nevýhodou u sítí s uzemněným uzlem okamžité vypínání jednopólových poruch. Dojde-li k mezifázové poruše, přenesou se vliv poruchy ze soustavy nižšího napětí do sítě vn, kde se projeví proudovými nárazy. Jen ve vlastních sítích vn mohou vznikat jednopólové zkratové proudy. Tyto jevy zjednodušují nastavení ochran proti jednopólovým zkratům.

Při zemním spojení se v místě poruchy k proudu odporem superponuje kapacitní proud procházející do země, čímž se zajistí spolehlivější reakce nadproudových ochran jednopólové poruchy.



Obr. 3.5 Činný odpor v uzlu trojfázové sítě

Při vzniku poruchy izolace poklesne fázové napětí poškozené fáze a napětí uzlu se změní na blízkou hodnotu fázového napětí. Dojde-li ke zkratu, místem poruchy protéká proud činným odporem a kapacitní proud celé sítě. Velikost proudu je závislá na rozloze sítě a s rostoucí vzdáleností, od napájecího transformátoru klesá. Správnou volbou odporu R omezíme zkratové proudy. Likvidace poruchy je obdobná jako při jednofázovém zkratu. Aby tlumení přepětí správně fungovalo, musí být splněna podmínka, aby jmenovitý proud rezistoru byl větší než kapacitní proud sítě:

$$I_R \geq I_{kap} \quad (3.18)$$

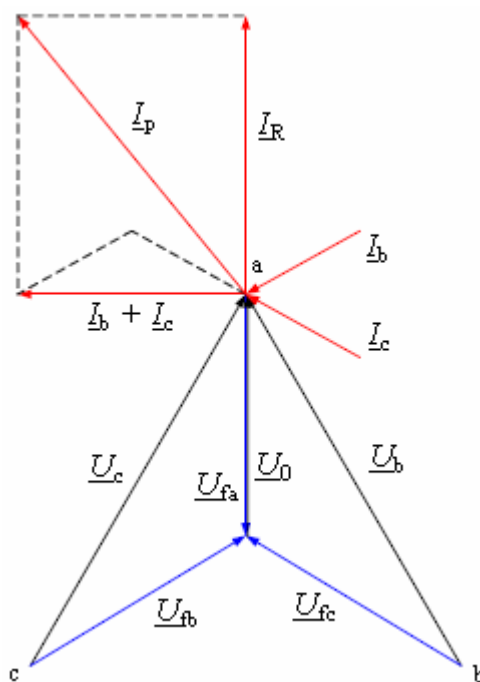
$$\frac{U_f}{R} \geq 3\omega k_0 U_f \quad (3.19)$$

Pro odpor uzlového rezistoru tedy platí:

$$R \leq \frac{1}{3\omega k_0} \quad (3.20)$$

Proud poruchy je dán vektorovým součtem kapacitních proudů sítě a jmenovitým proudem uzlového odporu.

$$\underline{I}_p = -\left(\frac{1}{R} + j3\omega k_0\right)\underline{U}_f = \underline{I}_R + \underline{I}_{kap} \quad (3.21)$$



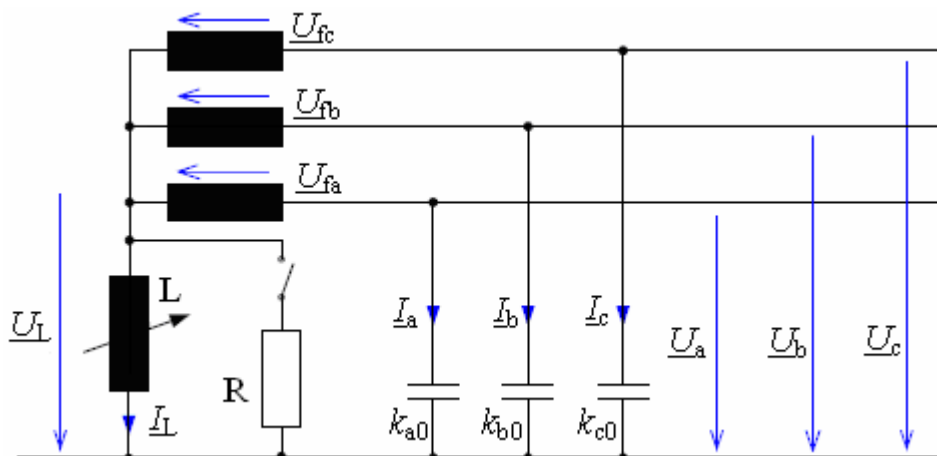
Obr. 3.6 Fázový diagram při zemní poruše v blízkosti transformátoru

U zapojení uzlu přes odpor se i přechodná porucha vypíná natrvalo, což je výhodné v kabelových sítích, kde porucha znamená poškození kabelu, ten pak nelze dále provozovat. U venkovních vedení často vznikají přechodné poruchy, ale nedochází k poškození vedení. Proto je nežádoucí trvalé vypnutí z hlediska častého výpadku odběrateli elektrické energie. Pro tyto případy je vhodné použít systém OZ (opětovného zapnutí). Jeho funkcí se podstatně sníží čas, kdy dané vedení vypnuté kvůli krátkodobým poruchám.

Překročí-li kapacitní proudy sítě hodnotu asi 400 A, je uzemnění přes rezistor nutné. Tam kde se kapacitní hodnoty pohybují v rozmezí od 5 do 400 A, je možné připojit do sítě uzlový rezistor.

3.3 Sít' s přechodným uzemněním uzlu

Jedná se o kompenzaci přes tlumivku a v případě déle trvajícího zemního spojení se připne paralelně tlumivce rezistor.



Obr. 3.7 Schéma sítě s přechodným uzemněním uzlu

Princip tohoto zařízení spočívá v tom, že při vzniku zemního spojení se připne rezistor, zvětší se poruchový proud, což umožní rychlejší reakci zemních ochran. Proud tekoucí uzlem musí být větší než kapacitní proud sítě:

$$R \leq \frac{1}{3\omega k_0} \quad (3.22)$$

Rezistor je spínán automaticky, podle potřeby při delším trvání zemního spojení. Dojde-li ke vzniku zemního spojení, zařízení vyčká určitý nastavený čas, pokud zemní spojení samo nezhasne, připne rezistor. Zvýšené napětí nad určenou mez na měřicích vinutích zhášecí tlumivky je automatickou vyhodnocováno jako zemní spojení. Automatika se používá ve dvojím režimu. V sítích, které mohou být po určitý čas provozovány se zemním spojení, slouží jako signalizace poruchy, a nebo v opačném případě sama vypne poškozenou větev. Pokud napětí na tlumivce klesne pod rozběhovou hodnotu na dobu delší než 10 sekund, automatika považuje zemní spojení za zaniklé.

3.4 Soustava s nepřímo uzemněným nulovým uzlem přes Bauchův transformátor

Funguje stejně jako zhášecí tlumivka. Lze jej použít u transformátoru, který nemá vyvedený nulový bod. Důvodem, proč se toto zařízení nepoužívá, je velká nákladnost.

4 Možnosti lokalizace místa zemního spojení

4.1 Lokalizace vývodu se zemním spojením

Základní rozdíl mezi zdravým a postiženým vývodem je v poruchovém proudu, který protéká u postiženého vývodu od místa zemního spojení k nulovému bodu. Jeho velikost vyjádříme vztahem:

$$I_{por} = j3\omega CU_f \quad (4.1)$$

Tento proud však není srovnatelný s proudy zátěže a proto je obtížné jej v síti rozpoznat měřeními jednotlivých fází. Tímto způsobem lze poruch rozpoznat např. v sítích 110 kV, kde zemní proudy překračují provozní několika násobně. Pro zjištění vývodu se zemním spojením se používají takové veličiny, které nesouvisí s fázovými proudy. Tyto proudy se dají zjistit metodou součtového zapojení transformátorů, kde se v jejich uzlu uzavírá proud:

$$\sum I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (4.2)$$

V kabelových sítích lze použít součtové transformátory proudu, které jsou umístěny u vývodu kabelu a obepínají všechny fáze. Tam kde je proudové kritérium jednoznačné, lze využít přímého užití proudu k určení vývodu se zemním spojením v jiných případech se použije směrové nadproudové kritérium.

4.1.1 Lokalizace místa zemního spojení pomocí postupného vypínání úseků v síti vn

Tímto způsobem se vyhledá co nejmenší odpojitelný úsek, ve kterém došlo k poruše, který se následně vypne. Odpinání jednotlivých částí vedení se provádí dálkově řízenými úsečnickovými odpojovači. Tento způsob lokalizace lze využít tam, kde nedojde k ekonomickým škodám v důsledku přerušení dodávky elektrického proudu nebo jinému omezení odběratele. Proto se používá jen v malých a středních rozvodnách. Dalším nebezpečím je vznik přepětí, ke kterému dochází při spínacích procesech, což může způsobit tepelné a mechanické namáhání vedení a následně dojde k opětovnému zemnímu spojení. tento způsob lokalizace je zdoluhavý a ekonomicky náročný.

4.1.2 Lokalizace zemního spojení pomocí zkruhování sítě

Tento způsob zjišťování poruchy lze použít tam, kde je možné spojit paralelně vedení v normálním stavu s vedením které má zemní poruchu a utvořit tak kruh. Vzdálenost místa zemní poruchy je dáno poměrem admitancí zdravého a poruchového vývodu. Ne vždy lze tuto metodu použít.

4.2 Lokalizace v síti s uzemněným uzlem

Odečteme-li u sítí s uzemněným uzlem kapacitní proudy celé sítě od proudu vlastního vývodu (v sítích s jedním vývodem je výsledek roven nule), dostaneme součtový proud vývodu s poruchou. Pro zjištění poruchového vývodu proudovým kritériem, musí být proud zemní ochrany při poruše odlišný na vývodu a mimo něj. Tohoto musíme docílit u dokonalých kovových zemních spojení i u odporových. V mezním případě při napětí uzlu 33% U_f se v poruchovém vývodu 33% kapacitního

proudu sítě. Tyto proudy by měly dostatečnou měrou přesáhnout velikost hodnoty nadproudových ochran, vyjádřených podmínkou:

$$I_{nas} \leq \frac{0,33I_{kap}}{k_c P_i} \quad (4.3)$$

k_c – koeficient citlivosti ochrany, zaručující spolehlivý náběh

P_i – převod proudového transformátoru

Dále musí být dodržena podmínka, aby ochrana nenaběhla při zemním spojení na jiné vedení, kde pouze protéká vlastní kapacitní proud vývodu. Lze tedy napsat podmínka pro použitelnost napětového kritéria pro vývod:

$$I_C \geq 3k_b k_c I_{C1} \quad (4.4)$$

k_b – koeficient bezpečnosti

V mezních případech se může kapacitní proud rovnat minimálně 4,7 násobku vlastního kapacitního proudu vývodu. V praxi tato podmínka nebývá splněna, proto se používají v sítích s izolovaným uzlem směrové ochrany, které hlídají směr jalového proudu, výkonu, napětí uzlu a součtový proud vývodu.

$$Q = U_0 \sum I \sin \varphi \quad (4.5)$$

Směr a výkon se od sebe u zdravého a postiženého vývodu výrazně liší, postačí tedy splnit podmínku dostatečné citlivosti.

[5], [13]

4.3 Lokalizace v síti s kompenzací zemních kapacitních proudů

V těchto sítích má zásadní význam na velikost a směr jalové složky proudu u vývodu s poruchou nastavení ochrany sítě, tedy nastavení zhášecí tlumivky. Jako kritérium tedy použijeme činný výkon zemní ochrany a u ochran elektronických směr součtového proudu. Jelikož v sítích dochází k primárním nesymetriím, nesymetriím zátěže nebo ve vlastních proudových transformátorech se uzlem těchto transformátorů uzavírá takzvaný rušivý proud. Při zemním spojení u kompenzovaných sítí se záměrně zvyšuje poruchový proud proto, aby zemní ochrany byly nastaveny nad rušivý proud. Tuto podmínku pro dostatečný výkon ke spolehlivému rozběhu vyjádříme vztahem:

$$P_{nast} \leq \frac{(\sum P - P_{ruš})}{k_c} \quad (4.6)$$

P_{nast} – hodnota výkonu nastavení relé

$\sum P$ – přepočtený zbytkový výkon působící na relé

k_c – koeficient citlivosti zemního relé

Nastavení relé musí být dostatečně velké nad hodnotu rušivých výkonů. Jelikož tyto výkony určujeme orientačně, je jejich velikost dána podmínkou $P_{nast} \geq 2P_{ruš}$. Dále je zapotřebí pro správnou funkci orientovaných ochran správně zapojit proudové a napěťové obvody.

4.3.1 Lokalizace v síti s odporovým uzemněním uzlu

V těchto sítích lze jednoduše zjistit zemní poruchu pomocí nadproudového kritéria. Velikost jmenovitých proudů uzlových odporníků je taková, že nelze předpokládat, že proudy zemních poruch budou dostatečně velké oproti proudům zátěže, proto i v těchto případech ochrany vyhodnocují součtový proud. I zde platí, že proud při zemní poruše musí být dostatečně velký, aby bezpečně naběhly ochrany, což je dáno podmínkou:

$$I_{nast} \leq \frac{\sum I_{min}}{k_c P_i} \quad (4.7)$$

I_{min} – minimální proud při poruše

Jelikož může dojít k poruše ne přímo na daném vedení, je třeba ochranu nastavit taky, aby měla dostatečnou velikost nad součtovým kapacitním proudem při poruše mimo vlastní vedení:

$$I_{nast} < I_{CV} k_b \quad (4.8)$$

I_{CV} – vlastní kapacitní proud vedení

Minimální hodnota poruchového proudu v kabelových vedeních je dána vztahem:

$$I_{pmin} = \frac{0,7U_f}{(R_N + R_V)} \quad (4.9)$$

R_V – činný odpor vedení

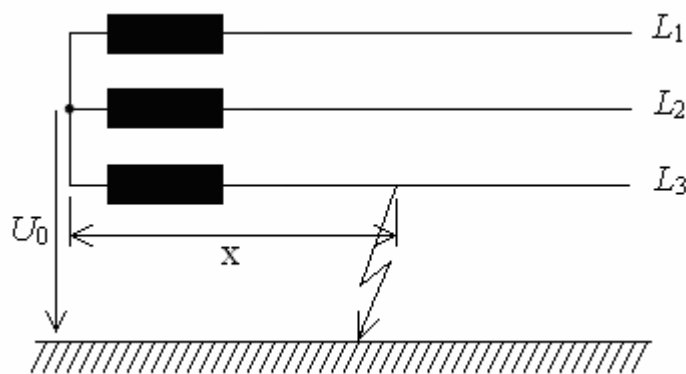
R_N – jmenovitá hodnota odporu uzemnění

Tyto podmínky nelze splnit u velkých kabelových sítích, kde jsou velké vlastní kapacitní proudy vývodů, které neumožňují dostatečně nízké seřízení ochrany. Z těchto důvodů se použijí zemní wattové ochrany. Jelikož sítě s odporovým zapojením uzlu řadíme mezi sítě, kde je nutnost zemní poruchu vypnout okamžitě, musíme použít časové zpoždění k docílení selektivity u sítí s více ochrannými úseky.

[5], [13]

4.4 Lokalizace zemního spojení s využitím napěťového kritéria

V tomto případě pro rozpoznání zemního spojení postačí napěťová ochrana. Ta měří napětí uzlu transformátoru proti zemi. Síť s neuzemněným uzlem má za normálního provozu skoro nulové napětí proti zemi. Dojde-li k poruše, napětí mezi uzlem a zemí se zvedne na hodnotu U_0 . Velikost tohoto napětí roste se vzdáleností místa poruchy x od transformátoru, lze říci, že je úměrně závislá.



Obr. 4.1 Napětí uzlu při zemním spojení

Pro měření tímto způsobem se připojí měřicí transformátor napětí na uzel trať a hlídá hodnotu napětí U_0 mezi uzlem a zemí. Není-li tento způsob možný, použijeme tři přístrojové transformátory napětí do otevřeného trojúhelníka zapojené na jednotlivé fáze. Uzel vstupní hvězdy těchto transformátorů musí být uzemněn.

Tuto ochranu použijeme tam, kde si můžeme dovolit vypnout celou síť. Není totiž možné vypnout pouze její část. Například tam, kde strana vysokého napětí tvoří nedílný celek v síti, kde transformátor pracuje s alternátorem v bloku.

Měřicí transformátory, které se používají v ochranách, jsou navrženy tak, aby byly schopny potlačit vyšší harmonické složky napětí U_0 . Pokud by nedocházelo k odstranění těchto složek, mohlo by při citlivém nastavení těchto ochran dojít k nežádoucímu ovlivnění jejich funkce.

[5], [13]

4.5 Lokalizace zemního spojení s využitím proudového kritéria

Použijeme-li tento způsob pro selektivní zjištění místa zemního spojení, je nutné znát zemní kapacitní proudy chráněného vývodu I_{CV} a okolní připojených sítí I_{CS} , tyto hodnoty zjistíme výpočtem:

$$I_{CS} = 3\omega_N C_{OS} U_N \quad (4.10)$$

$$I_{CV} = 3\omega_N C_{OV} U_N \quad (4.11)$$

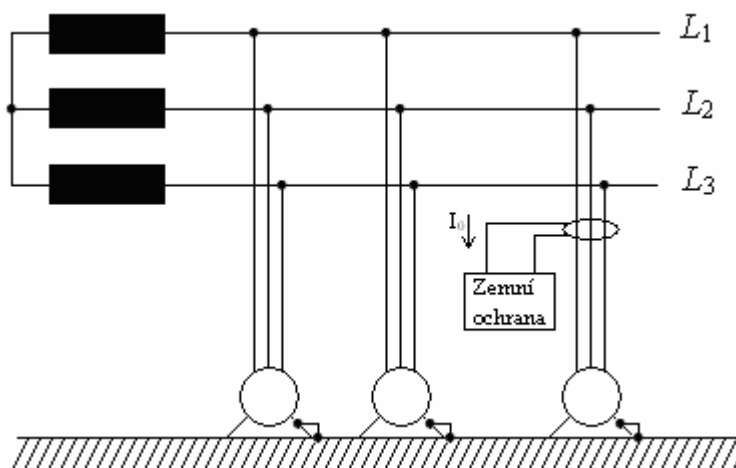
- I_{CS} – kapacitní proud sítě
- I_{CV} – kapacitní proud chráněného vývodu
- C_{OS} – kapacita jedné fáze nezatížené sítě
- C_{OV} – kapacita jedné fáze nezatíženého vývodu
- U_N – jmenovité fázové napětí
- ω_N – jmenovitá úhlová frekvence sítě

Rozlišujeme dva případy pro určení selektivity místa zemního spojení:

$$\text{a) je-li } I_{CS} \gg I_{CV} \quad (4.12)$$

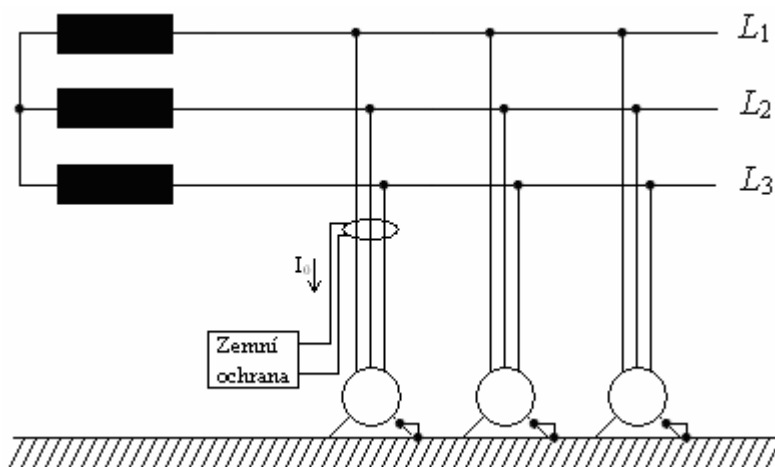
$$\text{b) je-li } I_{CS} \approx I_{CV} \quad (4.13)$$

a) Kapacitní proud sítě je mnohonásobně větší než kapacitní proud chráněného vývodu. Splní-li se tato podmínka, použijeme ochranu znázorněnou na Obr. 4.2. V místě ochrany prochází při poruše na vývodu nulová složka kapacitního proudu sítě I_{CS} s nulovou složkou kapacitního proudu vedení I_{CV} . Hodnota proudové ochrany I_0 je nastavena mezi hodnoty proudů $I_{CV} < I_0 < I_{CS}$. Tato podmínka postačuje k selektivitě a bezpečnému určení místa poruchy. Pro napojení zemní proudové ochrany získáme nulovou složku zemního proudu I_0 z průvlekového transformátoru.



Obr. 4.2 Zemní ochrana v nekompenzované síti

b) V tomto případě je kapacitní proud sítě srovnatelný s proudem chráněného objektu. Zjistíme-li výpočtem zemních kapacitních proudů, že jen velikost zemního kapacitního proudu I_{KAP} není postačující pro správné určení místa zemního spojení, použijeme zapojení ochrany podle Obr. 4.3. Tato ochrana pracuje na principu změny směru poruchového proudu, při zemním spojení podle toho, je-li zemní spojení v síti nebo na vývodu. Pokud je tedy zemní spojení na straně vývodu, síť je z této strany napájena kapacitním proudem a naopak. Ochrana působí jen pokud dojde ke spojení uvnitř vývodu. Nulovou složku proudu měříme tak průvlekovými transformátory nebo třemi přístrojovými transformátory.



Obr. 4.3 Zemní ochrana v nekompenzované síti, při srovnatelném kapacitním proudu s proudem chráněného objektu.

4.6 Možnosti využití HDO pro lokalizaci zemního spojení

Celý název je hromadné dálkové ovládání. Tento systém řídí a ovládá ostatní prvky pomocí přenosu informací silnoproudou rozvodnou sítí, dále pak speciální síť z optického kabelu také využívá rádiový signál. HDO se nejčastěji vysílá po silnoproudé síti. Důvodem je, že musíme budovat zvláštní síť, ale stačí použít již hotovou přenosovou síť. V dnešní době je na rozvodnou síť připojeno skoro 100% uživatelů, což je velká výhoda z ekonomického hlediska. Rozvodná síť, která se využívá pro systém HDO, je navržena pro optimální provoz při kmitočtu sítě 50 Hz. Jelikož systém HDO pracuje s vyššími frekvencemi, dojde ke zhoršení parametrů sítě, které pak budou nepříznivě ovlivňovat provoz systému HDO.

Vlastnosti systému HDO:

- přenos signálu z centrálního bodu do mnoha geograficky rozptýlených míst
- nemožnost ověření vykonání povelu (žádná zpětná signalizace)
- špatné zajištění správnosti přijatého kódu
- pro zvýšení pravděpodobnosti přijetí správného signálu opakujeme vysílání povelu

Využití HDO v různých typech ovládání pro energetické účely:

- ovládání spínačů v podružných silnoproudých vedeních
- ovládání pomocných transformačních stanic
- spínání kondenzátorových baterií pro kompenzaci účinníku
- ovládání spínačů zemního spojení

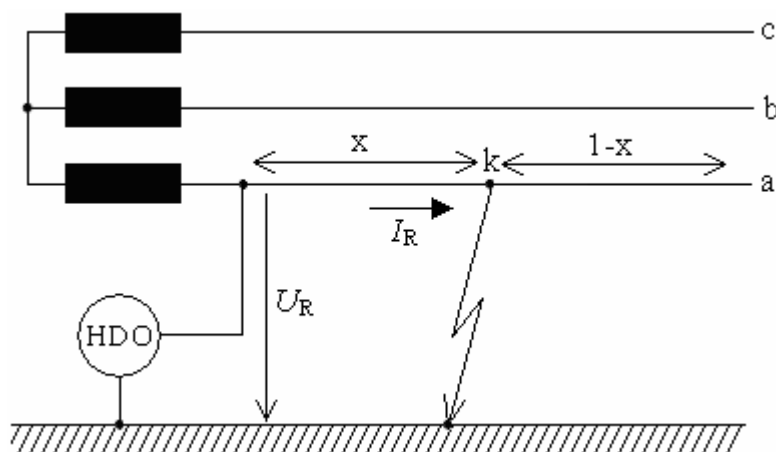
Systém HDO má mnoho způsobů využití, lze s ním ovládat například elektrické spotřebiče, přepínat tarify, signalizovat a ovládat různé druhy osvětlení.

Informace, vyslaná od vysílače HDO se přenáší k jednotlivým přijímačům, se uskuteční pomocí kódování impulzů na vyšší frekvenci. Pro tyto účely jsou vymezeny frekvence 21,6; 283; 425; 750; 1050 Hz. Tyto frekvence jsou nesuperponovány na síťové frekvenci.

Systém HDO lze také využít pro zjištění zemního spojení. Využívá se zde toho, že při vyšší vybrané ovládací frekvenci narůstá pouze sériová impedance vedení, kterou pro síťový kmitočet 50 Hz můžeme zanedbat. V případě, že je napájena jen fáze se zemním spojením při použití vysílače HDO, je možné pro tento případ, který je zobrazen na Obr. 4.4, určit při zanedbání vzájemných a rozptylových kapacit vztah:

$$Z_R = \frac{U_R}{I_R} \quad (4.14)$$

Z_R – impedance smyčky vodič – zem



Obr. 4.4 Připojení vysílače HDO při zemním spojení

Při použití souměrných složek lze napsat:

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_0 = 3 \frac{U_1}{I_1} = 3 \frac{U_R}{I_R} \quad (4.15)$$

Známe-li hodnotu impedance Z_{k1} , Z_{k2} , Z_{k0} a je-li $Z_{k1} = Z_{k2}$, pak je impedance poruchové smyčky:

$$Z = x(2Z_{k1} + Z_{k0}) \quad (4.16)$$

x – vzdálenost poruchy od místa měření

Pro jednofázové napájení signálu HDO platí:

$$U_b = U_a = 0 \quad (4.17)$$

$$U_1 = U_2 = U_0 = \frac{U_R}{3} \quad (4.18)$$

Pro impedanci dostaneme tedy vztah:

$$Z_R = \frac{Z}{3} \quad (4.19)$$

Zanedbáme-li vzájemné a rozptylové kapacity, je možné určit teoretickou hodnotu impedance:

$$Z_t = \frac{x}{3} ((2R_{k1} + R_{k0}) + jn(2X_{k1} + X_{k0})) \quad (4.20)$$

n – je násobek frekvence 50 Hz

Pro zjištění zemního spojení v radiální síti vycházíme ze souměrných složek. Vezmeme-li v úvahu síť vysokého napětí 22 kV, kde je signál HDO vysílán do sběrnice napájecí rozvodny. Vycházíme

z předpokladu, že proudy ve všech třech fázích a, b, c tekoucí z vysílače HDO do sběrnice rozvodny a fázová napětí, která jsou na sběrnici rozvodny 22 kV, jsou změřeny. Snímané veličiny si označíme např.: $I_{ain}, I_{bin}, I_{cin}$ – zkráceně I_{abcin}

$U_{ain}, U_{bin}, U_{cin}$ – zkráceně U_{abcin}

Z těchto měření jsou pak vyhodnocovány souměrné složky I_{120in}, U_{120in} , kde indexy 1, 2, 0 znamenají souslednou, zpětnou a nulovou složku.

Souměrné složky proudů $I_{120in}(x)$ a napětí $U_{120in}(x)$, které jsou funkcí hledaného místa poruchy, lze vypočítat z parametrů úseku před místem zemního spojení a z naměřených hodnot I_{120in}, U_{120in} . Známe-li hodnoty souměrných složek napětí v místě poruchy $U_{120in}(x)$, může z parametrů části sítě za poruchou vyjádřit souměrné složky proudů označené I_{120in} , které jsou taktéž funkcí x . Můžeme tedy napsat pro místo spojení:

$$U_{1k}(x) + U_{2k}(x) + U_{0k}(x) = 3RI_{1k}(x) \quad (4.21)$$

Vypočteme-li kořeny této rovnice a porovnáme je, jsme schopni určit pravděpodobnou hledanou vzdálenost x místa zemního spojení. Tato vzdálenost je závislá:

- na velikosti neznámého odporu oblouku
- na použité frekvenci vysílače HDO
- na zkreslení měřených signálů I_{abcin}, U_{abcin} zejména při přerušovaných zemních spojeních
- na přesnosti měření
- na zvoleném modelu prvků sítě

[5], [13]

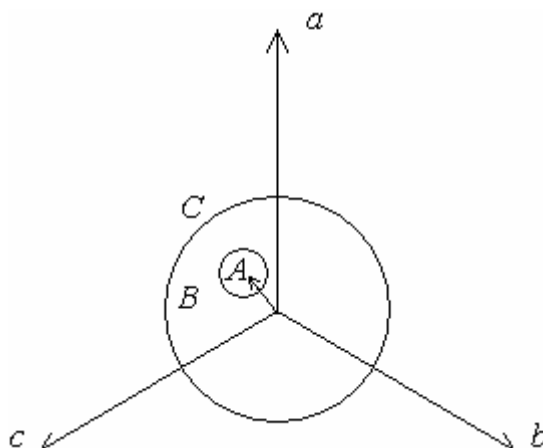
4.7 Systém Swedish Neutral

Jedná se o zařízení, které chrání při zemním spojení. Je schopno rychle a bezpečně stanovit místo poruchy v kompenzovaných sítích vysokého napětí. Zařízení je schopno zajistit zemní spojení, slouží jako směrová ochrana pro celou rozvodnu, dále pak kompenzuje zbytkové proudy v místě zemního spojení, určí místo zemního spojení, hlídá síť a samo ladí tlumivku.

Provozujeme-li síť tak, že ji nevypínáme při zemních spojeních, dochází často k časovému prodlení mezi okamžikem vzniku zemního spojení a okamžikem jeho odstranění. V tomto čase se automatická kompenzace zbytkového proudu stará o zajištění místa poruchy. Při kabelových zemních spojeních ve zhašených sítích zabraňuje kompenzace zbytkových proudů opětovnému zapálení oblouku. Pokud by se neprováděla kompenzace, zpětné zápaly by vedly ke zničení kabelu a tudíž k mezifázovému zkratu nebo dvojnásobnému zemnímu spojení na různých kabelech. Tyto kabely by v tomto případě byly vypnuty zkratovou ochranou. Pokud je síť v normálním provozu, ochranný systém, hlídá na sběrných veličinách sítě, jako je tlumení, nesymetrie a rozladění sítě. Tyto veličiny jsou hlavním kritériem pro automatické představení tlumivky a kompenzačního systému. Vznikne-li zemní spojení, okamžitě se začne signalizovat porucha, do 2,5 s se spustí kompenzace zbytkového proudu. Poškozené vedení se připojí k vedení zdravému, takzvané zkruhování sítě, pro přesnější určení místa poruchy.

4.7.1 Funkce systému za normálního provozu

Při normálním stavu sítě hlídá ochrana napětí U_0 sítě ve vztahu k amplitudě a fázi. Dále systém porovnává měrné hodnoty s přednastavenými mezními hodnotami.



Obr. 4.5 A – toleranční oblast, B – změny sítě, C – zemní spojení

Umístění napětí U_0 je závislé na aktuálních hodnotách tlumení, nesymetrie a rozladění. Pokud se síť nezmění, pohybují se hodnoty napětí U_0 v rozmezí toleranční plochy A. Dojde-li ke změnám v síti v důsledku přepojování, přesune se hodnota napětí U_0 do oblasti B a při zemním spojení s různými hodnotami přechodového odporu se napětí U_0 přesune do oblasti C.

4.7.2 Funkce při zemním spojení

Napětí U_0 se pohybuje v rozmezí hodnot oblasti C, což je znázorněno na Obr. 4.5, automatika přepne do režimu při zemním spojení. Jako první se přeměří nulové admitance jednotlivých vývodů. Porovnáním nulových admitancí naměřených za normálního stavu s hodnotami naměřenými při poruše, se určí vývod se zemním spojením.

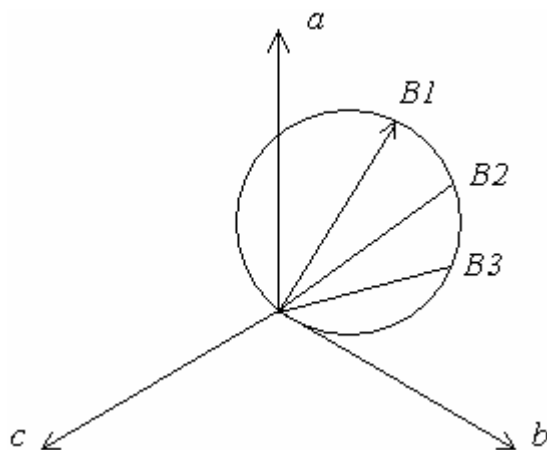
Po těchto úkonech přijde na řadu připojení kompenzátorů zbytkových proudů (RCC) a řízením jeho výstupních napětí do té doby, dokud nulová adnotace postiženého vývodu nedosáhne své hodnoty za normálního provozu, která je uložena v paměti. Po dokončení těchto úkonů je místo poruchy prakticky bez proudů a napětí. RCC systém je navržen na nepřetržitý provoz, energii čerpá z vlastní spotřeby rozvodny.

4.7.3 Způsob lokalizace místa zemního spojení

Tato funkce vychází z předpokladu, že lze připojit postižený vývod ke zdravému z té samé přípojnice. Dojde k zkruhování sítě a automatika měřením zjistí vzdálenosti místa poruchy z obou stran rozvodny.

4.7.4 Skokové ladění tlumivky

Ladění tlumivky se provádí s krokem 1 % jejího rozsahu. Tlumivku lze přeladit z minima do maxima během několika sekund po povelu, což je obrovskou výhodou. Kombinací sepnutí vakuových spínačů se provádí vlastní regulace indukčnosti cívky.



Obr. 4.6 Princip ladění Swedish Neutral

B1 – bod naladění (vrchol rezonanční křivky U_0)

B2 – náhodný ladicí bod 2

B3 – náhodný bod 1

Tento způsob řešení problematiky ladění je velice specifický oproti běžným způsobům. Znázornili jsme si na rovině fázových napětí ladicí proces. Automatika tlumivku nastaví tak, že tlumivka je zaměřena na dva libovolné ladicí body Obr. 4.6. Po té si změří jejich souřadnice a uloží do paměti. Všechny tyto body i s nulovým bodem leží na kružnici, jejíž vypočtený průměr je vrchol nulového napětí, kam je tlumivka skokem přepnuta. U klasických způsobů ladění hledá systém bod naladění tím, že mění vzduchovou mezeru magnetického obvodu tlumivky. Jedno z kritérií pro naladění tlumivky, je nesymetrie fázorových napětí. Podlazování tlumivky je tedy automaticky řízeno.

Výhody použití SN

- velmi kvalitní a rychlé naladění soustavy v běžném provozu
- nemožnost vzniku následných poruch, celkové snížení počtu poruch
- síť lze bezpečně provozovat se zemním spojením
- minimální výpadky elektrické energie u koncových odběratelů, vypne pouze část s poruchou na dobu opravy

[12]

5 Praktický návrh kompenzačního zařízení

Praktický výpočet kompenzačního zařízení si ukážeme na kabelových vývodech z rozvodny 110/10 kV Dy0. Celková délka vývodů o hladině napětí 10 kV je 50 km, tato síť je tvořena kabelem N2XSEYFGbY 6/10 kV (6 kV je napětí fázové U_f a 10 kV napětí sdružené U_s).

Tab. 3 Výřez z katalogového listu

Technické parametry zvoleného kabelu N2XSEYFGbY 6/10 kV						
Počet žil x průřez jádra [mm ²]	Vnější průměr cca [mm]	Činný odpor jádra [Ω/km]	Indukčnost [mH/km]	Kapacita [μF]	Hmotnost kabelu [kg/km]	Proudové zatížení v zemi při 20°C [A]
3 x 120/16	67	0,153	0,308	0,291	8600	349

Nejprve vypočteme celkovou kapacitu sítě:

$$C_k = 0,291 [\mu F] \quad (5.1)$$

$$C_V = l \cdot C_k = 50 \cdot 0,291 = 14,55 [\mu F] \quad (5.2)$$

Poruchový kapacitní proud:

$$I_P = 3\omega \cdot C_V \cdot U_f = 3 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 14,55 \cdot 10^{-6} \frac{10000}{\sqrt{3}} = 79,17 [A] \quad (5.3)$$

Dimenzování indukčnosti kompenzační tlumivky:

$$I_L = -I_C \Rightarrow -j \frac{U_0}{\omega L} = -3j\omega C_0 U_0 \quad (5.4)$$

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C_V} = \frac{1}{3 \cdot (2\pi \cdot 50)^2 \cdot 14,55 \cdot 10^{-6}} = 0,232 [mH] \quad (5.5)$$

Výkon zhášecí tlumivky:

$$S = U_0 \cdot I_L = j \frac{U_0 \cdot U_0}{\omega L} = j3\omega C_0 \cdot U_0^2 = j3\omega C_0 \cdot U_f^2 = j\omega C_0 U^2 \quad (5.6)$$

$$Q = \omega \cdot C_V \cdot U_s^2 = 2\pi \cdot 50 \cdot 14,55 \cdot 10^{-6} \cdot 10000^2 = 457,1 [kVAr] \quad (5.7)$$

Podle normy ČSN 33 3070 se zhášecí tlumivka připojí k uzlu transformátoru. Není-li z napájecího transformátoru vyveden uzel, připojí se tlumivka přes uměle vytvořenou trojfázovou nulu. Jmenovitá napětí tlumivky a sítě musí být shodná.

Poměr jmenovitých výkonů zhášecí tlumivky a transformátoru ke kterému je připojena musí odpovídat tomu, že jmenovitý výkon zhášecí tlumivky připojené k transformátoru, který má jednu stranu zapojenou do trojúhelníka, musí být do 30 % jmenovitého výkonu transformátoru. Určení počtu napájecích tlumivek se určí z počtu napájecích transformátorů, samostatně provozovaných přípojníc a velikosti kapacitního proudu jednotlivých sítí.



Obr. 4.7 Výřez z katalogu (použitý kabel)

6 Závěr

Cílem této Bakalářské práce bylo zabývat se provozem sítí nn a vn v poruchovém stavu, konkrétně se zemním spojením a následně možnostmi kompenzace zemních kapacitních proudů. Na začátku této práce jsme se seznámili s jednotlivými parametry popisovaných sítí a možnostmi pokládání kabelů. Byly zmíněny druhy materiálů pro elektrovednou část vedení a kabelů i jejich izolace.

Zemní spojení jsem teoreticky popsal ve všech možných případech. Byly popsány podmínky pro jeho vznik i zánik a jeho nepříznivé účinky na chod sítě i kabel nebo popřípadě vedení samotné. Uvedl jsem velikost hodnot, pro které je kompenzace doporučena a pro které je povinná.

Dále jsem uvedl možnosti kompenzace zemního spojení v sítích vn, kde byl uzel transformátoru uzemněn přes kompenzační členy nebo jejich kombinace. Některé systémy jsou více používané v praxi než ty ostatní, a proto se o některých zmiňuji jen okrajově. V kapitole *Možnosti kompenzace zemního spojení* bylo také popsáno nastavení zhášecí tlumivky.

V kapitole *Možnosti lokalizace místa zemního spojení* jsem popsal možné způsoby vyhledání místa zemního spojení. V této problematice se řeší rychlost nalezení místa, způsob nalezení a co nejmenší doba odpojení poškozené větve od rozvodné sítě. Uvedl jsem řadu metod od jednoduchých např.: *Postupné vypínání úseků* až po moderní automatické systémy, jako *Systém Swedish Neutral*, který je schopen hlídat síť v bezporuchovém stavu a při změně měřených parametrů nad únosnou hranici, která je nastavená, automaticky spustit kompenzaci ve velmi krátkém čase, čímž zajistí chod sítě i s poruchou.

Na závěr jsem uvedl praktický výpočet kompenzačního prvku, v tomto případě zhášecí tlumivky v modelové síti. Ze známých hodnot uvedených výrobcem použitého kabelu a délky vedení byla vypočtena celková kapacita vedení, dále pak poruchový proud a výkon zhášecí tlumivky.

Podstatou této práce bylo vypracovat kompletní přehled problematiky provozování sítí nn a vn se zemním spojením, možnostmi jeho rychlého rozpoznání a odstranění, popřípadě provozem v tomto stavu, kdy se porucha částečně omezí kompenzací.

Seznam použité literatury

- [1] Santarius, P.: Elektrické stanice a vedení, Skripta VŠB – TU Ostrava , 1990
- [2] Hodinka, M.: Přenos a rozvod elektrické energie, SNTL, 1989
- [3] Trojánek,Z., Hájek,J., Kvasnica,P.: Přechodové jevy v elektrizačních soustavách.SNTL 1988
- [4] Dohnalem, P.: Ochrany pro průmysl a energetiku, SNTL, 1991
- [5] Toman, P.: Lokalizace místa zemních spojení v sítích VN, Brno, 2002
- [6] Norma ČSN 33 3070.: Kompenzace kapacitních zemních proudů v sítích vysokého napětí
- [7] Systém Swedish Neutral
http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25492
- [8] Zemní spojení v trojfázových soustavách
<http://www.powerwiki.cz/attach/ES/ZemniSpojeni.pdf>
- [9] Katalog kabelů
http://www.kabelyvodice.cz/kabely-vodice/09_2XSEYFGbY.php
- [10] Urbiš,V.: Bakalářská práce, Zemní kapacitní proudy a jejich kompenzace v důlních sítích VN
- [11] Doc.Dr.ing. Jiří Gurecký, Studijní opory, Zemní spojení
- [12] Unger,J.: Bakalářská práce, Zemní kapacitní proudy a jejich kompenzace v kabelových sítích nn a vn
- [13] Hrabina,T.: Bakalářská práce, Zemní kapacitní proudy a jejich kompenzace v kabelových sítích nn a vn